



**TUGAS AKHIR - TE 141599**

**DETEKSI FERORESONANSI PADA TRANSFORMATOR  
TIGA FASA YANG TIDAK SIMETRI TERHADAP  
PENGARUH DARI PENGUBAHAN KAPASITANSI**

Krishanti Andarini  
NRP 2213100176

Dosen Pembimbing  
Dr.Eng. I Made Yulistya Negara, ST., M.Sc.  
I Gusti Ngurah Satriyadi Hernanda, ST., MT.

DEPARTEMEN TEKNIK ELEKTRO  
Fakultas Teknologi Elektro  
Institut Teknologi Sepuluh Nopember  
Surabaya 2017





***FINAL PROJECT - TE 141599***

**DETECTION OF FERRORESONANCE ON  
ASYMMETRIC THREE PHASE TRANSFORMER DUE  
TO CAPACITANCE VARIATION**

Krishanti Andarini  
NRP 2213100176

Dosen Pembimbing  
Dr.Eng. I Made Yulistya Negara, ST., M.Sc.  
I Gusti Ngurah Satriyadi Hernanda, ST., MT.

ELECTRICAL ENGINEERING DEPARTMENT  
Faculty of Electrical Technology  
Institut Teknologi Sepuluh Nopember  
Surabaya 2017



## **PERNYATAAN KEASLIAN TUGAS AKHIR**

Dengan ini saya menyatakan bahwa isi keseluruhan tugas akhir saya dengan judul “**Deteksi Feroresonansi Pada Transformator Tiga Fasa Yang Tidak Simetri Terhadap Pengaruh Dari Pengubahan Kapasitansi**” adalah benar-benar hasil karya intelektual mandiri, diselesaikan tanpa menggunakan bahan-bahan yang tidak diizinkan dan bukan karya pihak lain yang saya akui sebagai karya sendiri.

Semua referensi yang dikutip maupun dirujuk telah ditulis secara lengkap pada daftar pustaka. Apabila ternyata pernyataan ini tidak benar, saya bersedia menerima sanksi sesuai peraturan yang berlaku.

Surabaya, 22 Juli 2017

**Krishanti Andarini**  
NRP. 2213100176



**DETEKSI FERORESONANSI PADA TRANSFORMATOR  
TIGA FASA YANG TIDAK SIMETRI TERHADAP  
PENGARUH DARI PENGUBAHAN KAPASITANSI**

**TUGAS AKHIR**

**Diajukan Guna Memenuhi Sebagian Persyaratan  
Untuk Memperoleh Gelar Sarjana Teknik  
Pada  
Bidang Teknik Sistem Tenaga  
Departemen Teknik Elektro  
Institut Teknologi Sepuluh Nopember**

**Menyetujui:**

**Dosen Pembimbing I**

**Dosen Pembimbing II**

**Dr.Eng. I Made Yulistya N., ST., M.Sc.**

**IGN Satriyadi H., ST., MT.**

**NIP 197007121998021001**

**NIP 197301232002121001**







# **DETEKSI FERORESONANSI PADA TRANSFORMATOR TIGA FASA YANG TIDAK SIMETRI TERHADAP PENGARUH DARI PENGUBAHAN KAPASITANSI**

**Nama Mahasiswa** : Krishanti Andarini  
**NRP** : 2213100176  
**Dosen Pembimbing I** : Dr. Eng. I Made Yulistya Negara, ST.,  
M.Sc.  
**Dosen Pembimbing II** : I Gusti Ngurah Satriyadi Hernanda,  
ST., MT.

## **ABSTRAK**

Ketidaksimetrian pada transformator tiga fasa dapat terjadi karena adanya kecacatan isolasi, faktor lingkungan seperti kelembaban, atau bahkan keretakan pada inti yang menyebabkan persebaran fluks di tiap fasa pada kurva magnetisasi berbeda. Hal tersebut dapat membahayakan sebuah transformator, karena dapat memunculkan feroresonansi. Tugas akhir ini menggunakan *software* ATPDraw dan diagram bifurkasi pada MATLAB untuk pendeteksian feroresonansi pada transformator tiga fasa yang tidak simetri dengan menambahkan gangguan *switching* dan pengubahan kapasitansi. Hasil dari tugas akhir ini memperlihatkan bahwa pada variasi *grading capacitance*, tidak dipengaruhi oleh sudut fasa sehingga pada kurva magnetisasi yang sama, menghasilkan karakteristik feroresonansi yang sama dengan peluang feroresonansinya sebesar 65% untuk fasa A dan C, sedangkan pada kurva magnetisasi yang berbeda, menghasilkan karakteristik yang berbeda dengan peluang feroresonansinya sebesar 41% untuk fasa B. Pada variasi *shunt capacitance* dipengaruhi oleh sudut fasa sehingga terjadi perbedaan hasil peluang dan karakteristik feroresonansi pada ketiga fasa, yaitu 43% fasa A, 41% fasa B, dan 38% fasa C.

**Kata kunci:** feroresonansi, transformator tiga fasa, induktansi nonlinier, ATPDraw, diagram bifurkasi

*---Halaman ini sengaja dikosongkan---*

# **DETECTION OF FERRORESONANCE ON ASYMMETRIC THREE PHASE TRANSFORMER DUE TO CAPACITANCE VARIATION**

**Name** : Krishanti Andarini  
**NRP** : 2213100176  
**Advisor I** : Dr. Eng. I Made Yulistya Negara,ST.,  
M.Sc.  
**Advisor II** : I Gusti Ngurah Satriyadi Hernanda,  
ST., MT.

## ***ABSTRACT***

The asymmetric three phase transformer may occur due to an isolation defect, environmental factors such as moisture, or even cracks in the core that cause the flux in each phase on different value of magnetization curves. This can harm a transformer, because it can lead to ferroresonance. In this study, ATPDraw software and bifurcation diagram in MATLAB used to detect the ferroresonance phenomenon in asymmetric three phase transformer by adding switching fault and capacitance variation. The result shows that in the variation of grading capacitance, it is not affected by the phase angle so that on the same magnetization curve, it produces the same ferroresonance characteristics with a 65% chance of ferroresonance for the A and C phases, whereas on the different magnetization curves, which differs from the 41% chance of ferroresonance for phase B. Meanwhile, shunt capacitance variation is affected by the phase angle so that there are differences of probability and ferroresonance characteristics in the three phases, 43% phase A, 41% phase B, and 38% phase C.

**Keyword:** ferroresonance, three phase transformer, nonlinear inductance, ATPDraw, bifurcation diagram

*---Halaman ini sengaja dikosongkan---*

## **KATA PENGANTAR**

Puji syukur penulis panjatkan kehadiran Allah SWT yang selalu memberikan rahmat dan hidayah-Nya sehingga tugas akhir ini dapat terselesaikan tepat waktu. Shalawat serta salam semoga selalu dilimpahkan kepada Rasulullah Muhammad SAW, keluarga, sahabat, dan umat muslim yang senantiasa meneladani beliau.

Tugas akhir ini disusun untuk memenuhi sebagian persyaratan guna menyelesaikan pendidikan Sarjana pada Bidang Studi Teknik Sistem Tenaga, Departemen Teknik Elektro, Fakultas Teknologi Elektro, Institut Teknologi Sepuluh Nopember yang berjudul:

### **DETEKSI FERORESANSI PADA TRANSFORMATOR TIGA FASA YANG TIDAK SIMETRI TERHADAP PENGARUH DARI PENGUBAHAN KAPASITANSI**

Pada kesempatan ini penulis menyampaikan ucapan terimakasih kepada:

1. Tuhan Yang Maha Kuasa atas limpahan rahmat dan karunia-Nya.
2. Bapak Nugroho, Ibu Vivie, Adik Duto Adi Nugroho serta seluruh keluarga besar yang tak terlukiskan jasanya dalam mendampingi saya hingga menjadi seorang sarjana.
3. Bapak Dr.Eng. I Made Yulistya Negara, ST.,M.Sc dan I Gusti Ngurah Satriyadi Hernanda, ST., MT. selaku dosen pembimbing yang telah banyak membantu dan berbagi ilmu selama penelitian tugas akhir ini.
4. Bapak Dr. Eng. Ardyono Priyadi, S.T, M.Eng. selaku Ketua Jurusan serta seluruh dosen dan karyawan yang telah memberikan banyak ilmu dan bantuannya selama proses perkuliahan di Teknik Elektro ITS.
5. Oktaviani Nur Fitriadewi, Dio Randa Damara, dan Charell Naufal Kiramindyo, Mas Arief Budi Ksatria, dan Mas Mochammad Wahyudi yang senantiasa membantu memberikan masukan dalam penulisan tugas akhir ini.
6. Teman-teman asisten Laboratorium Tegangan Tinggi yang telah banyak membantu dalam proses pengerjaan tugas akhir ini.
7. Seluruh keluarga besar e-53 atas semangat dan motivasi selama 4 tahun di jurusan teknik elektro.

8. Pihak-pihak lain yang belum bisa penulis sebutkan satu per satu yang ikut membantu dalam penyelesaian tugas akhir ini.

Penulis menyadari bahwa tugas akhir ini masih memiliki banyak kekurangan, oleh karena itu saran dan masukan sangat diharapkan untuk perbaikan di masa yang akan datang. Semoga tugas akhir ini bermanfaat bagi pembaca dan masyarakat pada umumnya.

Surabaya, 22 Juli 2017

Penulis

# DAFTAR ISI

## HALAMAN JUDUL

## PERNYATAAN KEASLIAN

## HALAMAN PENGESAHAN

<b>ABSTRAK .....</b>	<b>i</b>
<b>ABSTRACT .....</b>	<b>iii</b>
<b>KATA PENGANTAR .....</b>	<b>v</b>
<b>DAFTAR ISI .....</b>	<b>vii</b>
<b>DAFTAR GAMBAR .....</b>	<b>xi</b>
<b>DAFTAR TABEL .....</b>	<b>xv</b>

## BAB 1 PENDAHULUAN

1.1 Latar Belakang .....	1
1.2 Sistematika Penulisan .....	3

## BAB 2 SISTEM TRANSMISI, TRANSFORMATOR, DAN FERORESONANSI

2.1 Sistem Tenaga Listrik .....	5
2.1.1 Sistem Transmisi Tenaga Listrik .....	5
2.1.2 Klasifikasi Saluran Sistem Transmisi .....	6
2.1.3 Kendala Pada Sistem Transmisi .....	8
2.2 Transformator .....	8
2.2.1 Pengertian Transformator .....	8
2.2.2 Konstruksi Transformator .....	9
2.2.3 Prinsip Kerja Transformator .....	10
2.2.4 Rangkaian Ekuivalen Transformator .....	11
2.2.5 Kerugian Pada Transformator .....	11
2.2.6 Kurva Magnetisasi Transformator .....	12
2.3 Feroresonansi .....	13
2.3.1 Pengertian Resonansi .....	13
2.3.2 Pengertian Feroresonansi .....	14
2.3.3 Perbedaan Resonansi dan Feroresonansi .....	15
2.3.4 Karakteristik Feroresonansi .....	15
2.3.5 Gejala-gejala Feroresonansi .....	17

## BAB 3 PEMODELAN FERORESONANSI

3.1 Pemodelan Rangkaian Feroresonansi .....	19
3.2 Pengambilan Data .....	22

3.3	Pengolahan Data.....	22
<b>BAB 4 ANALISIS HASIL SIMULASI FERORESONANSI PADA TRANSFORMATOR TIGA FASA YANG TIDAK SIMETRI</b>		
4.1	Kondisi Normal .....	25
4.2	Feroresonansi Akibat <i>Switching</i> .....	26
4.2.1	Feroresonansi Akibat Variasi <i>Grading Capacitance</i> ( $C_g$ ).....	27
4.2.2	Feroresonansi Akibat Variasi <i>Shunt Capacitance</i> ( $C_s$ ) .....	41
4.2.3	Pengaruh Waktu <i>Switching</i> Terhadap Feroresonansi .....	56
<b>BAB 5 PENUTUP</b>		
5.1	Kesimpulan.....	63
5.2	Saran.....	64
<b>DAFTAR PUSTAKA .....</b>		65
<b>LAMPIRAN .....</b>		67
<b>RIWAYAT HIDUP .....</b>		71



# TABLE OF CONTENT

<b>TITLE</b>	
<b>STATEMENT SHEET</b>	
<b>APPROVAL SHEET</b>	
<b>ABSTRAK</b> .....	i
<b>ABSTRACT</b> .....	iii
<b>PREFACE</b> .....	v
<b>TABLE OF CONTENT</b> .....	ix
<b>LIST OF FIGURES</b> .....	xi
<b>LIST OF TABLES</b> .....	xv

## CHAPTER 1 INTRODUCTION

1.1	Background .....	1
1.2	Systematic of Report Writing .....	3

## CHAPTER 2 TRANSMISSION SYSTEM, TRANSFORMER, AND FERRORESONANCE

2.1	Electrical Power System .....	5
2.1.1	Electrical Transmission System .....	5
2.1.2	Transmission System Classification .....	6
2.1.3	Transmission System Problem .....	8
2.2	Transformer .....	8
2.2.1	Transformer Definition .....	8
2.2.2	Transformer Construction .....	9
2.2.3	Principle Work of Transformer .....	10
2.2.4	Transformer Equivalent Circuit .....	11
2.2.5	Transformer Losses .....	11
2.2.6	Transformer Magnetization Curve .....	12
2.3	Ferroresonance .....	13
2.3.1	Resonance Definition .....	13
2.3.2	Ferroresonance Definition .....	14
2.3.3	The Difference Between Resonance and Ferroresonance .....	15
2.3.4	Ferroresonance Characteristics .....	15
2.3.5	Ferroresonance Symptoms .....	17

## CHAPTER 3 FERRORESONANCE MODELLING

3.1	Ferroresonance Modelling Circuit .....	19
-----	----------------------------------------	----

3.2	Data Retrieval .....	22
3.3	Data Processing .....	22
<b>BAB 4 THE RESULT ANALYSIS OF FERRORESONANCE ON ASYMMETRIC THREE PHASE TRANSFORMER SIMULATION</b>		
4.1	Normal Condition .....	25
4.2	Ferroresonance Due To Switching .....	26
4.2.1	Ferroresonance Due To Grading Capacitance (Cg) Variation.....	27
4.2.2	Ferroresonance Due To Shunt Capacitance (Cs) Variation.....	41
4.2.3	Ferroresonance Due Switching Time Variation.....	56
<b>BAB 5 FINAL</b>		
5.1	Conclusion.....	63
5.2	Recomendation.....	64
<b>BIBLIOGRAPHY .....</b>		65
<b>ATTACHMENT .....</b>		67
<b>BIOGRAPHY OF AUTHOR.....</b>		71

## DAFTAR GAMBAR

Gambar 2.1.	<i>Single line</i> diagram sistem tenaga listrik sederhana .....	5
Gambar 2.2.	Konstruksi dari inti transformator.....	9
Gambar 2.3.	Rangkaian ekuivalen transformator .....	11
Gambar 2.4.	Kurva magnetisasi transformator.....	12
Gambar 2.5.	Rangkaian seri feroresonansi sederhana .....	13
Gambar 2.6.	Rangkaian feroresonansi sederhana menggunakan <i>ATPDraw</i> .....	15
Gambar 2.7.	<i>Fundamental Ferroresonance</i> (a) sinyal periodik (b) spektrum sinyal .....	16
Gambar 2.8.	<i>Subharmonic Ferroresonance</i> (a) sinyal periodik (b) spektrum sinyal .....	16
Gambar 2.9.	<i>Quasi-Periodic Ferroresonance</i> (a) sinyal periodik (b) spektrum sinyal .....	17
Gambar 2.10.	<i>Chaotic Ferroresonance</i> (a) sinyal periodik (b) spektrum sinyal .....	17
Gambar 3.1.	Rangkaian pemodelan feroresonansi dengan transformator tiga fasa.....	20
Gambar 3.2.	Kurva magnetisasi pada ketiga fasa .....	22
Gambar 3.3.	<i>Flowchart</i> pengambilan dan pengolahan data .....	23
Gambar 4.1.	Respon tegangan fasa A (a) respon tegangan fasa B (b) Respon tegangan fasa C (c) pada saat kondisi normal .....	26
Gambar 4.2.	Respon arus fasa A (a) respon arus fasa B (b) Respon arus fasa C (c) pada saat kondisi normal .....	26
Gambar 4.3.	Respon tegangan dengan $C_g$ 0,009 $\mu F$ (a) Respon tegangan dengan $C_g$ 0,09 $\mu F$ (b) Respon tegangan dengan $C_g$ 0,9 $\mu F$ (c) Respon tegangan dengan $C_g$ 9 $\mu F$ (d) pada fasa A.....	28
Gambar 4.4.	Diagram bifurkasi tegangan pada fasa A .....	29
Gambar 4.5.	Respon tegangan dengan $C_g$ 0,009 $\mu F$ (a) Respon tegangan dengan $C_g$ 0,09 $\mu F$ (b) Respon tegangan dengan $C_g$ 0,9 $\mu F$ (c) Respon tegangan dengan $C_g$ 9 $\mu F$ (d) pada fasa B.....	30
Gambar 4.6.	Diagram bifurkasi tegangan pada fasa B .....	31

Gambar 4.7.	Respon tegangan dengan $C_g$ 0,009 $\mu\text{F}$ (a) Respon tegangan dengan $C_g$ 0,09 $\mu\text{F}$ (b) Respon tegangan dengan $C_g$ 0,9 $\mu\text{F}$ (c) Respon tegangan dengan $C_g$ 9 $\mu\text{F}$ (d) pada fasa C.....	32
Gambar 4.8.	Diagram bifurkasi tegangan pada fasa C .....	33
Gambar 4.9.	Respon arus dengan $C_g$ 0,009 $\mu\text{F}$ (a) Respon arus dengan $C_g$ 0,09 $\mu\text{F}$ (b) Respon arus dengan $C_g$ 0,9 $\mu\text{F}$ (c) Respon arus dengan $C_g$ 9 $\mu\text{F}$ (d) pada fasa A .....	34
Gambar 4.10.	Diagram bifurkasi arus pada fasa A .....	35
Gambar 4.11.	Respon arus dengan $C_g$ 0,009 $\mu\text{F}$ (a) Respon arus dengan $C_g$ 0,09 $\mu\text{F}$ (b) Respon arus dengan $C_g$ 0,9 $\mu\text{F}$ (c) Respon arus dengan $C_g$ 9 $\mu\text{F}$ (d) pada fasa B.....	36
Gambar 4.12.	Diagram bifurkasi arus pada fasa B.....	37
Gambar 4.13.	Respon arus dengan $C_g$ 0,009 $\mu\text{F}$ (a) Respon arus dengan $C_g$ 0,09 $\mu\text{F}$ (b) Respon arus dengan $C_g$ 0,9 $\mu\text{F}$ (c) Respon arus dengan $C_g$ 9 $\mu\text{F}$ (d) pada fasa C.....	38
Gambar 4.14.	Diagram bifurkasi arus pada fasa C.....	39
Gambar 4.15.	Respon tegangan dengan $C_g$ 0,009 $\mu\text{F}$ (a) Respon tegangan dengan $C_g$ 0,09 $\mu\text{F}$ (b) Respon tegangan dengan $C_g$ 0,9 $\mu\text{F}$ (c) Respon tegangan dengan $C_g$ 9 $\mu\text{F}$ (d) pada fasa A.....	42
Gambar 4.16.	Diagram bifurkasi tegangan pada fasa A.....	43
Gambar 4.17.	Respon tegangan dengan $C_g$ 0,009 $\mu\text{F}$ (a) Respon tegangan dengan $C_g$ 0,09 $\mu\text{F}$ (b) Respon tegangan dengan $C_g$ 0,9 $\mu\text{F}$ (c) Respon tegangan dengan $C_g$ 9 $\mu\text{F}$ (d) pada fasa B.....	44
Gambar 4.18.	Diagram bifurkasi tegangan pada fasa A.....	45
Gambar 4.19.	Respon tegangan dengan $C_g$ 0,009 $\mu\text{F}$ (a) Respon tegangan dengan $C_g$ 0,09 $\mu\text{F}$ (b) Respon tegangan dengan $C_g$ 0,9 $\mu\text{F}$ (c) Respon tegangan dengan $C_g$ 9 $\mu\text{F}$ (d) pada fasa C.....	46
Gambar 4.20.	Diagram bifurkasi tegangan pada fasa C .....	47
Gambar 4.21.	Respon arus dengan $C_g$ 0,009 $\mu\text{F}$ (a) Respon arus dengan $C_g$ 0,09 $\mu\text{F}$ (b) Respon arus dengan $C_g$ 0,9 $\mu\text{F}$ (c)	

	Respon arus dengan $C_g$ 9 $\mu\text{F}$ (d) pada fasa A.....	48
Gambar 4.22.	Diagram bifurkasi arus pada fasa A.....	49
Gambar 4.23.	Respon arus dengan $C_g$ 0,009 $\mu\text{F}$ (a) Respon arus dengan $C_g$ 0,09 $\mu\text{F}$ (b) Respon arus dengan $C_g$ 0,9 $\mu\text{F}$ (c) Respon arus dengan $C_g$ 9 $\mu\text{F}$ (d) pada fasa B.....	50
Gambar 4.24.	Diagram bifurkasi arus pada fasa B .....	51
Gambar 4.25.	Respon arus dengan $C_g$ 0,009 $\mu\text{F}$ (a) Respon arus dengan $C_g$ 0,09 $\mu\text{F}$ (b) Respon arus dengan $C_g$ 0,9 $\mu\text{F}$ (c) Respon arus dengan $C_g$ 9 $\mu\text{F}$ (d) pada fasa C.....	52
Gambar 4.26.	Diagram bifurkasi arus pada fasa C .....	53
Gambar 4.27.	Hasil feroresonansi dari variasi <i>grading</i> <i>capacitance</i> .....	55
Gambar 4.28.	Hasil feroresonansi dari variasi <i>shunt</i> <i>capacitance</i> .....	56
Gambar 4.29.	Respon tegangan saat <i>switching</i> terbuka pada 0,2 sekon (a) 0,2025 sekon (b) 0,205 sekon (c) 0,2075 sekon (d) 0,21 sekon (e) 0,2125 sekon (f) 0,215 sekon (g) 0,2175 sekon (h) .....	58
Gambar 4.30.	Respon arus saat <i>switching</i> terbuka pada 0,2 sekon (a) 0,2025 sekon (b) 0,205 sekon (c) 0,2075 sekon (d) 0,21 sekon (e) 0,2125 sekon (f) 0,215 sekon (g) 0,2175 sekon (h) .....	59
Gambar 4.31.	Respon tegangan saat <i>switching</i> terbuka pada 0,2 sekon (a) 0,2025 sekon (b) 0,205 sekon (c) 0,2075 sekon (d) 0,21 sekon (e) 0,2125 sekon (f) 0,215 sekon (g) 0,2175 sekon (h).....	60
Gambar 4.32.	Respon arus saat <i>switching</i> terbuka pada 0,2 sekon (a) 0,2025 sekon (b) 0,205 sekon (c) 0,2075 sekon (d) 0,21 sekon (e) 0,2125 sekon (f) 0,215 sekon (g) 0,2175 sekon (h).....	61

*---Halaman ini sengaja dikosongkan---*

## DAFTAR TABEL

Tabel 3.1.	Parameter rangkaian pemodelan feroresonansi.....	19
Tabel 3.2.	Parameter kurva magnetisasi pada fasa A dan fasa C...	21
Tabel 3.3.	Parameter kurva magnetisasi pada fasa B.....	21
Tabel 4.1.	Perbandingan hasil deteksi feroresonansi pada respon tegangan.....	40
Tabel 4.2.	Perbandingan hasil deteksi feroresonansi pada respon arus .....	40
Tabel 4.3.	Perbandingan hasil deteksi feroresonansi pada respon tegangan.....	54
Tabel 4.4.	Perbandingan hasil deteksi feroresonansi pada respon arus .....	54

*---Halaman ini sengaja dikosongkan---*



# BAB 1

## PENDAHULUAN

### 1.1 Latar Belakang

Sistem transmisi dan distribusi tenaga listrik merupakan proses penting dalam penyaluran tenaga listrik. Penyaluran tenaga listrik berawal dari pembangkit yang selanjutnya akan disalurkan ke tiap-tiap gardu induk melalui sistem distribusi tenaga listrik yang kemudian pada tahap berikutnya akan disalurkan ke konsumen. Dalam sistem transmisi dan distribusi tenaga listrik, terdapat komponen dan peralatan listrik yang penting, salah satu contohnya adalah transformator. Transformator digunakan untuk menaikkan dan menurunkan nilai tegangan sesuai dengan kebutuhan beban. Untuk itu, kinerja dari sebuah transformator diharapkan bisa mencapai optimal. Karena jika tidak, maka hal tersebut dapat menimbulkan masalah atau gangguan dalam proses penyaluran tenaga listrik.

Pada kenyataannya, terdapat fenomena transien yang dinamakan dengan fenomena feroresonansi. Feroresonansi merupakan fenomena dimana nilai induktansi berubah-ubah terhadap waktu dan pada saat tertentu ketika mendapat sebuah *trigger* berupa *switching*, sambaran petir, atau gangguan hubung singkat, nilai induktansi menjadi berpadanan dengan nilai kapasitansi. Kondisi seperti itulah yang dinamakan dengan fenomena feroresonansi. Feroresonansi dapat menyebabkan osilasi dalam interval waktu yang cukup lama. Feroresonansi juga dapat menyebabkan keadaan abnormal seperti *overvoltage*, *overcurrent*, ataupun harmonisa. Hal ini dapat mengganggu kinerja dan bahkan merusak transformator. Oleh karena itu, dibutuhkan deteksi peluang feroresonansi pada transformator tiga fasa dengan nilai kapasitansi yang bervariasi.

Pada studi ini, akan dilakukan simulasi pada transformator tiga fasa yang tidak simetri. Kondisi ketidaksimetrian ini diadopsi dari studi terdahulu tentang pengaruh topologi pemotongan inti pada transformator tiga fasa. Pada studi itu disebutkan bahwa nilai kuat medan magnet pada inti transformator tipe modifikasi lebih besar dibandingkan inti transformator tipe standar. Demikian pula yang terjadi dengan nilai intensitas medan magnet. Maka pada inti transformator dengan tipe modifikasi memiliki fluks total lebih banyak dan titik saturasinya lebih tinggi daripada inti standar [1]. Sehingga menimbulkan adanya perbedaan

pada induktansi nonlinear di salah satu fasa pada transformator tiga fasa tersebut.

Masalah yang akan dibahas pada studi ini adalah pengaruh pengubahan kapasitansi pada rangkaian pemodelan dengan fenomena feroresonansi pada transformator tiga fasa yang tidak simetri. Batasan masalah pada studi ini terdapat pada analisis efek dari *trigger* berupa *switching* pada rangkaian pemodelan transformator tiga fasa yang tidak simetri dan penentuan karakteristik feroresonansi dari hasil pemodelan melalui ATPDraw dan diagram bifurkasi menggunakan MATLAB. ATPDraw merupakan perangkat lunak yang digunakan untuk melakukan simulasi rangkaian pemodelan dengan fenomena transien. Sedangkan diagram bifurkasi merupakan diagram yang digunakan untuk mengolah data berupa perubahan kestabilan dalam dinamika suatu sistem pemodelan akibat perubahan variabel yang terdapat pada pemodelan tersebut [2].

Tujuan dari hasil simulasi pada studi ini dapat memberikan informasi berupa pendeteksian peluang feroresonansi yang akan terjadi pada transformator tiga fasa yang tidak simetri sehingga dapat dianalisis karakteristik feroresonansi yang akan muncul.

Relevansi pada studi ini adalah dengan adanya hasil peluang dari feroresonansi, diharapkan adanya perancangan sebuah transformator yang dapat meredam feroresonansi pada transformator tiga fasa yang tidak simetri. Hal ini bertujuan untuk meminimalisir peluang terjadinya feroresonansi.

Metode dalam studi ini dimulai dari studi literatur seperti mengumpulkan buku serta referensi yang berhubungan dengan feroresonansi. Kemudian pengumpulan data untuk mengetahui spesifikasi peralatan transformator daya tiga fasa. Setelah itu dilakukan pemodelan dan simulasi. Pemodelan dan simulasi ini menggunakan perangkat lunak berupa ATPDraw. Tujuan dari pemodelan dan simulasi ini adalah untuk mendeteksi peluang terjadinya feroresonansi apabila diberikan *trigger* berupa *switching* dengan nilai kapasitansi yang bervariasi. Langkah berikutnya adalah analisis hasil simulasi. Hasil yang didapatkan dari simulasi digunakan untuk menentukan peluang feroresonansi terjadi dan karakteristik feroresonansi. Kemudian langkah terakhir adalah memberikan kesimpulan mengenai pengubahan kapasitansi dengan peluang terjadinya fenomena feroresonansi beserta analisis karakteristik feroresonansi pada transformator tiga fasa yang tidak simetri serta memberikan saran untuk studi selanjutnya.

## 1.2 Sistematika Penulisan

Bab satu berisi tentang latar belakang, permasalahan, batasan masalah, tujuan, metodologi, sistematika penulisan, manfaat, relevansi dari penulisan pada studi ini.

Bab dua berisi teori penunjang yang membahas tentang sistem tenaga listrik khususnya sistem transmisi tenaga listrik, transformator, dan feroresonansi.

Bab tiga membahas tentang pemodelan rangkaian feroresonansi, metode pengambilan data menggunakan ATPDraw dan metode pengolahan data menggunakan diagram bifurkasi pada MATLAB yang akan digunakan dalam studi ini.

Bab empat berisi hasil simulasi pemodelan rangkaian feroresonansi berdasarkan parameter gangguan berupa *switching* menggunakan ATPDraw dan diagram bifurkasi menggunakan MATLAB.

Bab lima berisi kesimpulan dari simulasi dan analisis yang dilakukan melalui sebuah rangkaian pemodelan feroresonansi dan saran untuk penelitian atau studi selanjutnya.

*---Halaman ini sengaja dikosongkan---*

## BAB 2

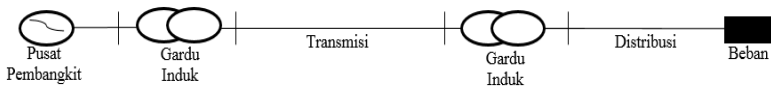
# SISTEM TRANSMISI, TRANSFORMATOR, DAN FERORESONANSI

### 2.1 Sistem Tenaga Listrik

#### 2.1.1 Sistem Transmisi Tenaga Listrik

Penyaluran listrik tentu tidak lepas dari sistem transmisi tenaga listrik. Sistem transmisi tenaga listrik merupakan penyaluran tenaga listrik yang berawal dari pusat pembangkit listrik. Pembangkit listrik merupakan tempat listrik dibangkitkan melalui *prime mover* dan generator sehingga dapat dihasilkan tenaga listrik. Proses selanjutnya adalah penyaluran listrik ke gardu induk. Kemudian pada sistem distribusi listrik akan disalurkan menuju ke konsumen.

Saluran-saluran transmisi merupakan rantai penghubung antara pusat-pusat pembangkit listrik dan sistem-sistem distribusi, dan melalui hubungan-hubungan antar sistem dapat pula menuju ke sistem tenaga yang lain. Suatu sistem distribusi menghubungkan semua beban-beban yang terpisah satu dengan yang lain kepada saluran-saluran transmisi [3].



**Gambar 2.1** *Single line diagram* sistem tenaga listrik sederhana [3]

Sistem penyaluran tenaga listrik dimulai dari sistem pembangkit yang kemudian akan disalurkan ke sistem transmisi setelah melewati transformator *step up*. Kemudian disalurkan ke saluran distribusi setelah melewati transformator *step down* sebelum akhirnya dapat dikonsumsi oleh konsumen listrik. Hubungan mengenai tegangan dan arus dalam sistem transmisi dijelaskan dalam persamaan berikut:

$$V = IZ \quad (2.1)$$

Keterangan:

V = Tegangan (Volt)

I = Arus (A)

Z = Impedansi (Ohm)

Saluran transmisi akan mengalami rugi-rugi tenaga, maka untuk mengatasi hal tersebut tenaga yang akan dikirim dari pusat pembangkit

ke pusat beban harus ditransmisikan dengan tegangan tinggi maupun tegangan ekstra tinggi. Rugi-rugi daya pada transmisi AC tiga fasa adalah sebagai berikut:

$$\Delta P = 3I^2 R \quad (2.2)$$

Keterangan:

P = Rugi-rugi daya transmisi AC tiga fasa (Watt)

$I^2$  = Arus pada kawat transmisi (Ampere)

R = Resistansi kawat transmisi tiap fasa (Ohm)

Sistem transmisi tegangan tinggi berfungsi untuk menyalurkan energi listrik dari satu gardu induk ke gardu induk lainnya. Sistem transmisi terdiri dari konduktor yang direntangkan antara tiang-tiang *tower* melalui isolator dengan sistem tegangan tinggi. Standar transmisi tegangan tinggi yang berlaku di Indonesia adalah 30 kV, 70 kV, 150 kV, dan 500 kV.

### 2.1.2 Klasifikasi Saluran Sistem Transmisi

Di Indonesia, konstruksi transmisi terdiri dari penggunaan kabel udara dan kabel tanah untuk tegangan rendah, menengah, dan tegangan tinggi [3]. Berikut adalah klasifikasi saluran sistem transmisi tenaga listrik berdasarkan nilai tegangannya:

- a. Saluran Udara Tegangan Ekstra Tinggi (SUTET)  
Memiliki interval tegangan operasi 200 – 500 kV. Digunakan pada pembangkitan dengan kapasitas di atas 500 MW. Tujuannya adalah untuk mereduksi drop tegangan dan penampang kawat secara maksimal sehingga dapat diperoleh operasional yang efektif dan efisien. Masalah yang timbul dalam pembangunan SUTET adalah konstruksi tiang yang besar dan tinggi, memerlukan lahan yang luas, memerlukan banyak isolator, sehingga berdampak kepada masalah biaya. Pembangunan transmisi ini cukup efektif untuk jarak 100 km sampai dengan 500 km.
- b. Saluran Udara Tegangan Tinggi (SUTT)  
Memiliki interval tegangan operasi 30 – 150 kV. Konfigurasi pada umumnya *single* atau *double circuit*. Dimana pada satu *circuit* terdiri dari tiga fasa dengan tiga atau empat kawat. Semakin besar kapasitas daya yang disalurkan, maka penghantar pada masing-masing fasa terdiri dari dua atau empat kawat dengan berkas konduktor atau *bundle conductor*. Apabila jarak transmisi lebih dari 100 km maka drop voltage terlalu besar. Hal ini menyebabkan tegangan pada

ujung transmisi menjadi rendah. Solusi untuk mengatasi hal tersebut yaitu menghubungkan sistem transmisi secara *ring system* atau *interconnection system*. Solusi ini telah diterapkan di Pulau Jawa.

- c. Saluran Udara Tegangan Menengah (SUTM)  
Memiliki interval tegangan operasi 6 – 30 kV. Transmisi SUTM digunakan pada jaringan tingkat tiga, yaitu jaringan distribusi yang menghubungkan dari gardu induk, penyulang, gardu distribusi, sampai dengan ke konsumen. Efektifitas penyalurannya hanya pada jarak (panjang) antara 15 km sampai dengan 20 km. Jika transmisi lebih dari jarak tersebut, efektifitasnya menurun, karena relay pengaman tidak bisa bekerja secara selektif.
- d. Saluran Udara Tegangan Rendah (SUTR)  
Memiliki interval tegangan operasi 0,04 – 1 kV. Transmisi SUTR adalah bagian hilir dari sistem tenaga listrik pada tegangan distribusi di bawah 1 kV, yang langsung memasok kebutuhan listrik tegangan rendah ke konsumen. Di Indonesia, tegangan operasi transmisi SUTR saat ini adalah 220/ 380 Volt.
- e. Saluran Kabel Tegangan Tinggi (SKTT)  
Memiliki interval tegangan operasi 30 – 150 kV. Kabel yang berisolasi *Poly Ethelene* atau kabel jenis *Cross Link Poly Ethelene* (XLPE). Kabel yang isolasinya berbahan kertas yang diperkuat dengan minyak atau *oil paper impregnated*. Memerlukan biaya yang lebih besar jika dibanding SUTT. Pada saat proses pembangunan memerlukan koordinasi dan penanganan yang kompleks.
- f. Saluran Kabel Tegangan Menengah (SKTM)  
Memiliki interval tegangan operasi 6 – 30 kV. Pembangunan transmisi SKTM lebih mahal dan lebih rumit, karena harga kabel yang jauh lebih mahal dibanding penghantar udara dan dalam pelaksanaan pembangunan harus melibatkan serta berkoordinasi dengan banyak pihak. SKTM memiliki fungsi yang sama seperti SUTM hanya saja instalasinya berada di dalam tanah.
- g. Saluran Kabel Tegangan Rendah (SKTR)  
Memiliki interval tegangan operasi 0,04 – 1 kV. Jika menggunakan SUTR sebenarnya dari segi jarak aman atau ruang bebas tidak ada masalah. Hal ini dikarenakan SUTR menggunakan penghantar berisolasi. Efektifitas penyalurannya hanya pada jarak (panjang) antara 15 km sampai dengan 20 km. Jika transmisi lebih dari jarak tersebut, efektifitasnya menurun, karena relay pengaman tidak bisa bekerja secara selektif.

### **2.1.3 Kendala Pada Sistem Transmisi**

Sistem transmisi yang ada tidak lepas dari berbagai kendala, berikut adalah kendala yang sering terjadi pada sistem transmisi:

- a. Frekuensi sistem yang tidak stabil  
Frekuensi standar yang digunakan oleh Indonesia adalah 50 Hz. Ketika terdapat gangguan pada sistem pembangkitan, frekuensi akan berubah. Perubahan dari frekuensi dapat merusak peralatan listrik maupun sistem kelistrikan itu sendiri. Nilai reaktansi pada saluran transmisi juga akan berubah. Otomatis hal ini akan mempengaruhi nilai impedansi yang terukur sehingga terjadi perbedaan antara nilai impedansi sebelum terjadi gangguan dan ketika terjadi gangguan.
- b. Fluktuasi daya pada sistem  
Fluktuasi daya dapat terjadi akibat masalah sinkronisasi pada generator yang mengakibatkan generator menjadi motor dan dianggap menjadi beban. Solusi dari masalah ini yaitu melepas generator yang menjadi titik gangguan dari sistem. Sehingga menyebabkan adanya arus yang timbul akibat fluktuasi daya sehingga memicu sistem proteksi untuk bekerja dan segera memutus aliran arus pada sistem.
- c. Gangguan hubung singkat  
Gangguan hubung singkat yang dapat terjadi dalam sistem transmisi adalah gangguan satu fasa ke tanah ataupun antar fasa. Oleh karena itu sistem transmisi harus memiliki sistem proteksi yang dapat bekerja secara optimal dan efisien agar pelayanan listrik ke konsumen tetap terjaga kontinuitasnya.

## **2.2 Transformator**

### **2.2.1 Pengertian Transformator**

Transformator adalah suatu peralatan tenaga listrik yang memiliki peranan penting dalam sistem tenaga listrik. Transformator berfungsi untuk menyalurkan tenaga atau daya listrik dari generator bertegangan menengah ke transmisi bertegangan tinggi dan untuk menyalurkan daya dari transmisi bertegangan tinggi ke jaringan distribusi. Hal ini bertujuan agar rugi-rugi daya yang mengalir pada sistem transmisi tenaga listrik tegangan tinggi tidak melebihi rugi-rugi yang diinginkan [3].

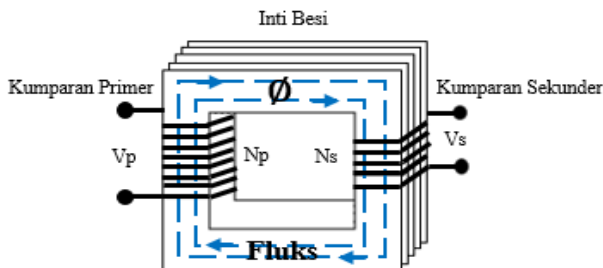
Dalam operasi umumnya, transformator tenaga ditanamkan pada titik netralnya sesuai dengan kebutuhan untuk sistem pengamanan atau proteksi, sebagai contoh transformator 150/70 kV ditanamkan secara



langsung di sisi netral 150 kV, dan transformator 70/20 kV ditanahkan dengan tahanan di sisi netral 20 kV.

### 2.2.2 Konstruksi Transformator

Konstruksi dari suatu transformator terdiri dari bagian-bagian utama yaitu inti transformator, kumparan, dan isolasi. Inti dari transformator biasanya terbuat dari lembaran baja silikon yang diisolasi dengan pernis. Kumparan tersebut terbuat dari tembaga. Terdapat dua kumparan, yaitu kumparan primer dan kumparan sekunder. Kumparan primer merupakan kumparan yang dihubungkan ke sumber energi, sedangkan kumparan sekunder dihubungkan ke beban. Sedangkan untuk bahan isolasi transformator tersusun dari kombinasi bahan dielektrik cair dengan dielektrik padat [3].



**Gambar 2.2** Konstruksi dari inti transformator

Berdasarkan konstruksi transformator di atas, hubungan tegangan dan arus antara sisi primer dan sisi sekunder adalah sebagai berikut:

$$\frac{V_p(t)}{V_s(t)} = \frac{N_p}{N_s} = a \quad (2.3)$$

Keterangan:

$V_p$  = Tegangan primer  
 $V_s$  = Tegangan sekunder  
 $N_p$  = Belitan primer  
 $N_s$  = Belitan sekunder

$$\frac{N_p}{N_s} = \frac{I_s(t)}{I_p(t)} = \frac{1}{a} \quad (2.4)$$

Keterangan:

$I_p$  = Arus primer  
 $I_s$  = Arus sekunder

### 2.2.3 Prinsip Kerja Transformator

Prinsip dasar dari suatu transformator adalah *mutual induction* antara dua rangkaian yang dihubungkan oleh fluks magnet. Dalam bentuk yang sederhana, transformator terdiri dari dua buah atau lebih kumparan induksi yang terpisah tetapi terhubung oleh magnet pada suatu jalur yang memiliki reaktansi rendah. Pada kedua kumparan yaitu kumparan primer dan kumparan sekunder terdapat *mutual induction* yang tinggi. Jika salah satu kumparan dihubungkan dengan sumber tegangan bolak-balik, maka akan muncul fluks bolak-balik pada inti besi yang terhubung dengan kumparan lain. Proses tersebut akan menimbulkan gaya gerak listrik induksi. Hal ini sesuai dengan Hukum Faraday [4]. Hukum Faraday menyatakan bahwa gaya gerak listrik terinduksi pada rangkaian tertutup sama dengan negatif rate perubahan fluks magnetik terhadap waktu di dalam rangkaian. Berdasarkan hukum Faraday yang menyatakan magnitudo dari *electromotive force* (emf) proporsional terhadap perubahan fluks terhubung dan hukum Lenz yang menyatakan arah dari emf berlawanan dengan arah fluks sebagai reaksi perlawanan dari perubahan fluks tersebut didapatkan persamaan sebagai berikut:

$$e = -N \frac{d\phi}{dt} \quad (2.5)$$

Keterangan:

- e = GGL induksi (Volt)
- N = Jumlah lilitan
- d $\phi$  = Perubahan garis-garis gaya magnet (Webber)
- dt = Perubahan waktu (s)

Perubahan fluks yang menghasilkan GGL tersebut dapat terjadi karena adanya perubahan fungsi waktu akibat arus bolak-balik yang berbentuk sinusoidal. Selain itu juga terdapat faktor fungsi putaran ( $\theta$ ) akibat berputarnya rotor pada mesin-mesin dinamis.

Dan pada transformer ideal yang dieksitasi dengan sumber sinusoidal berlaku persamaan sebagai berikut:

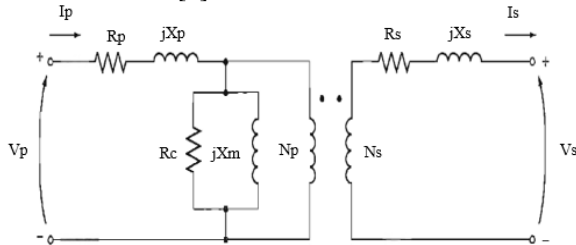
$$E = 4,44 \phi_m N f \quad (2.6)$$

Keterangan:

- E = Tegangan rms (Volt)
- $\phi_m$  = Fluks puncak
- N = Jumlah lilitan
- f = Frekuensi (Hz)

### 2.2.4 Rangkaian Ekuivalen Transformator

Rangkaian ekuivalen merupakan rangkaian untuk menganalisis kerja suatu transformator [4].



Gambar 2.3 Rangkaian ekuivalen tranformator [4]

Pada rangkaian ekuivalen terdapat fluks bocor  $\Phi_P$  untuk kumparan primer yang ditunjukkan sebagai reaktansi  $X_P$  dan fluks bocor  $\Phi_S$  untuk kumparan sekunder yang ditunjukkan sebagai reaktansi  $X_S$ . Sedangkan rugi tahanan untuk kumparan primer ditunjukkan dengan  $R_P$  dan rugi tahanan untuk kumparan sekunder ditunjukkan dengan  $R_S$ . Pada dasarnya rangkaian ekuivalen transformator ditambahkan rugi-rugi inti yaitu rugi-rugi *Hysterisis* dan *Eddy current*. Rugi-rugi ini digambarkan sebagai induktansi dan resistansi yang terhubung secara paralel dengan kumparan primer yang dilambangkan sebagai  $X_M$  untuk induktansi dan  $R_C$  untuk resistansi.

### 2.2.5 Kerugian Pada Transformator

Kerugian yang terjadi pada transformator harus diperhitungkan dalam setiap pemodelan sebuah transformator [4]. Hal utama yang harus dipertimbangkan dalam pemodelan sebuah transformator adalah sebagai berikut:

a. *Copper ( $I^2R$ ) losses*

Merupakan kerugian yang disebabkan karena adanya arus beban yang mengalir pada kawat tembaga sehingga menimbulkan panas komponen resistif yang ada pada sisi primer dan sisi sekunder pada transformator disebabkan dan gulungan sekunder transformator. Nilai dari kerugian tembaga ini sebanding dengan nilai kuadrat arus dalam tiap belitan [4].

b. *Eddy current losses*

Merupakan kerugian yang disebabkan arus pusar pada inti

transformator. Nilai dari kerugian ini sebanding dengan nilai kuadrat tegangan yang digunakan pada transformator [4].

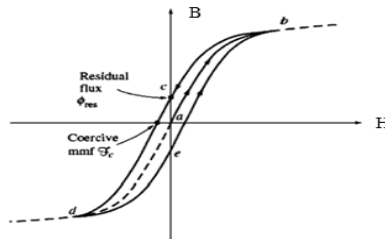
c. *Hysteresis losses*

Merupakan kerugian yang disebabkan oleh fluks bolak-balik pada inti besi [4].

d. *Leakage flux*

Merupakan kerugian berupa fluks pada  $\phi_{LP}$  dan  $\phi_{LS}$  yang keluar dari inti transformator dan melewati hanya satu belitan pada transformator. Fluks-fluks tersebut menghasilkan *self-inductance* pada kumparan sisi primer dan sekunder [4].

## 2.2.6 Kurva Magnetisasi Transformator



**Gambar 2.4** Kurva magnetisasi transformator

Kurva magnetisasi menggambarkan karakteristik dari sebuah transformator yang menunjukkan hubungan antara kerapatan magnetik yang disimbolkan sebagai B dengan intensitas medan magnetik yang disimbolkan sebagai H. Kurva magnetisasi merepresentasikan inti dari sebuah transformator. Berdasarkan Gambar 2.4 jalur a-b merupakan kondisi awal transformator pada saat diberikan arus. Kerapatan fluks akan meningkat hingga mencapai titik saturasinya. Ketika nilai arus menurun, nilai fluks juga akan menurun melalui jalur b-c-d. Hal ini dikarenakan adanya faktor fluks sisa. Untuk memaksa fluks mencapai nilai nol, maka sejumlah *magnetomotive force* dibutuhkan dan dikenal dengan istilah *coercive magnetomotive force*. Ketika nilai arus meningkat, nilai fluks juga akan meningkat melalui jalur d-e-b. Hal ini juga dikarenakan adanya faktor fluks sisa.

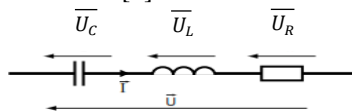
Ketika intensitas medan magnet sudah mencapai titik nol, kerapatan fluks tidak mencapai titik nol karena adanya fluks sisa. Fluks sisa tersebut dipengaruhi oleh permeabilitas inti transformator. Dan hal ini dipengaruhi oleh pemilihan bahan material inti transformator.

Semakin baik jenis material inti trafo yang digunakan maka kurva histerisis akan semakin kurus atau semakin cenderung linear. Dan begitu juga sebaliknya apabila material inti trafo yang digunakan kurang baik maka kurva histeris akan cenderung semakin lebar [5].

## 2.3 Ferroresonansi

### 2.3.1 Pengertian Resonansi

Fenomena resonansi dapat ditemukan pada sistem tenaga listrik dari semua tingkat tegangan. Hal tersebut dapat diamati pada resonansi *earthed system (Petersen coil)* yang digunakan untuk meminimalkan arus gangguan ke tanah dengan tegangan menengah satu fasa. Selain contoh tersebut, resonansi juga merupakan alasan rusaknya bahan dielektrik atau *thermal* dan penuaan dini dari peralatan listrik akibat *overvoltage* atau *overcurrent* (resonansi harmonik) [6].



**Gambar 2.5** Rangkaian seri ferroresonansi sederhana

Persamaan pada rangkaian resonansi dengan kondisi sinusoidal adalah sebagai berikut:

$$U = E \cos (\omega_n t) \quad (2.7)$$

Didapatkan persamaan hubungan antar tegangan sebagai berikut:

$$\vec{U} = \vec{U}_R + \vec{U}_L + \vec{U}_C \quad (2.8)$$

Keterangan:

- $\vec{U}$  = Vektor total tegangan
- $\vec{U}_R$  = Vektor tegangan resistor
- $\vec{U}_L$  = Vektor tegangan induktor
- $\vec{U}_C$  = Vektor tegangan kapasitor

Dalam kasus resonansi tertentu, nilai tegangan pada terminal kapasitor dan induktansi telah terkompensasi dan rangkaian dapat dikatakan dalam situasi resonansi. Sinyal berbentuk pulsa dari  $\omega_n$  yang mengalami resonansi dapat dijabarkan dengan persamaan sebagai berikut:

$$L C \omega_n^2 = 1 \quad (2.9)$$

Keterangan:

L = Induktor (Henry)

C = Kapasitor (Farad)

$\omega_n$  = Kecepatan sudut (Rad/s)

Nilai amplitudo dari arus adalah:

$$I = \frac{E}{R} \quad (2.10)$$

Nilai dari arus tersebut sangat besar. Amplitudo tegangan pada terminal kapasitor dan terminal induktor sama dengan k.E oleh karena itu nilai dari *quality factor* k adalah sebagai berikut:

$$k = \frac{L \omega_n}{R} = \frac{1}{R C \omega_n} \quad (2.11)$$

Berdasarkan nilai k, nilai amplitudo tegangan  $U_L = U_C$  bisa lebih kecil ataupun lebih besar dari amplitudo tegangan E akibat eksitasi tegangan U. Resonansi harmonik dapat terjadi ketika pulsa  $\omega_n$  bertepatan dengan nilai pulsa n  $\omega_0$ .  $\omega_0$  merupakan adalah sistem pulsa yang dihasilkan oleh mesin tertentu. Resonansi harmonik dapat menyebabkan efek berbahaya pada peralatan listrik sehingga perlu adanya pengaturan agar hal tersebut tidak terjadi [7] , [8].

### 2.3.2 Pengertian Feroresonansi

Feroresonansi atau resonansi non-linier merupakan fenomena kelistrikan kompleks nonlinear yang dapat mengakibatkan tegangan lebih, arus lebih, atau harmonisa pada sistem tenaga sehingga membahayakan sistem transmisi, sistem proteksi, peralatan listrik maupun operator [9].

Feroresonansi merupakan fenomena transien dengan kondisi nilai R dan C konstan, tetapi nilai L merupakan nilai yang berubah-ubah sepanjang waktu mengikuti kurva magnetisasi. Pada pengoperasian biasa, misalkan pada peralatan seperti transformator, nilai induktansi L bekerja pada daerah linier. Nilai L tidak sampai ujung dari kurva magnetisasi sehingga nilai L pada saat itu masih konstan. Pada saat kondisi transien seperti tersambar petir, terdapat proses *switching*, atau bahkan terjadi gangguan hubung singkat, hal itu dapat memicu rangkaian sehingga bergerak pada mode ujung-ujung kurva magnetisasi. Pada saat itu, nilai L akan berubah-ubah. Ketika nilai L berpadanan dengan nilai C, dengan frekuensi yang bukan 50 Hz, terbentuklah suatu respon dengan nama feroresonansi [6].

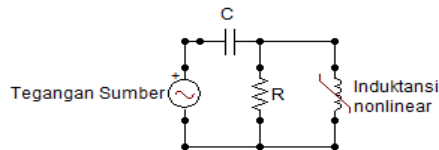
Dampak dari feroresonansi dapat menghasilkan osilasi yang tidak berhenti selama waktu yang cukup lama. Yang berakibat merusak peralatan. Feroresonansi dapat menimbulkan keadaan abnormal. Keadaan abnormal yang dimaksud adalah keadaan *overvoltage*, *overcurrent*, ataupun harmonisa. Ketika keadaan abnormal tersebut terjadi pada suatu peralatan, maka peralatan tersebut akan rusak apabila feroresonansi tidak segera diatasi [10] , [11].

### 2.3.3 Perbedaan Resonansi dan Feroresonansi

Resonansi linear terjadi pada rangkaian seri yang terdiri dari komponen resistor, induktor, dan kapasitor. Sebuah resonansi baru akan terjadi pada satu frekuensi, sesuai dengan frekuensi sumber. Respon dari resonansi adalah tegangan lebih dan arus lebih terjadi pada satu keadaan steady-state [9]. Persamaan untuk mencari frekuensi resonansi adalah sebagai berikut:

$$f_R = \frac{1}{2 \pi \sqrt{LC}} \quad (2.12)$$

Sedangkan feroresonansi sederhana terdiri dari elemen resistor, kapasitor, dan induktansi nonlinear (material feromagnetik). Elemen tersebut merupakan pemodelan dari sifat kapasitif dan induktif yang diperoleh dari penggunaan peralatan listrik dalam sistem tenaga listrik. Feroresonansi terjadi pada frekuensi tertentu, ketika induktansi non-linier sesuai dengan kapasitansi sistem. Tegangan lebih dan arus lebih terjadi pada beberapa keadaan steady-state [9].



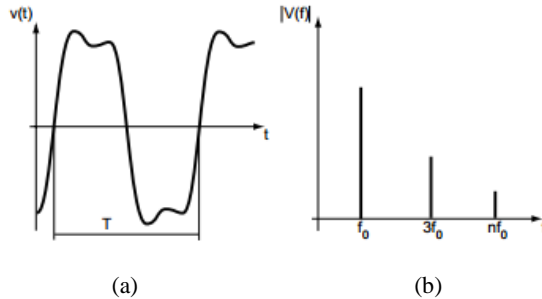
**Gambar 2.6** Rangkaian feroresonansi sederhana menggunakan ATPDraw

### 2.3.4 Karakteristik Feroresonansi

Hasil dari simulasi pemodelan rangkaian feroresonansi akan menunjukkan karakteristik dari feroresonansi [12]. Terdapat empat karakteristik dari feroresonansi. Berikut adalah karakteristik dari fenomena feroresonansi:

a. *Fundamental Ferroresonance*

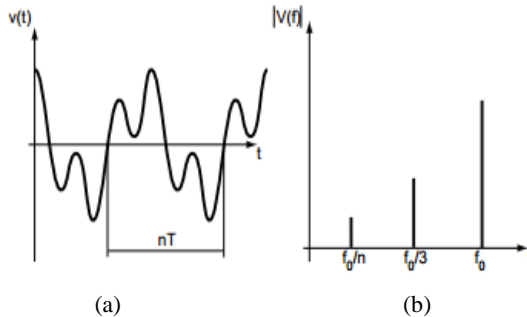
Respon tegangan dan arus dari karakteristik ini memiliki nilai periodik yang sama dengan nilai sistem. Spektrum sinyal terdiri atas frekuensi fundamental sistem sebagai respon yang dominan dan diikuti oleh harmonisa ke- 3, 5, 7, dan  $n$  harmonisa ganjil.



**Gambar 2.7** *Fundamental Ferroresonance* (a) Sinyal periodik  
(b) spektrum sinyal

b. *Subharmonic Ferroresonance*

Sinyal feroresonansi tipe ini memiliki periode kelipatan  $nT$  dari periode sumbernya. *Fundamental mode* dari suatu feroresonansi biasanya dituliskan dengan feroresonansi periode-1 ( $f_0/1$  Hz) dan feroresonansi dengan periode sub-kelipatan dari frekuensi sistem disebut feroresonansi periode- $n$  ( $f_0/n$  Hz).

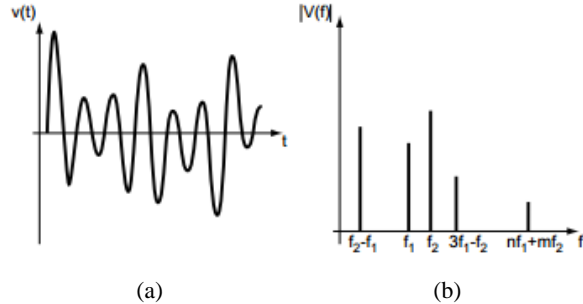


**Gambar 2.8** *Subharmonic Ferroresonance* (a) Sinyal periodik  
(b) spektrum sinyal

c. *Quasi-Periodic Ferroresonance*



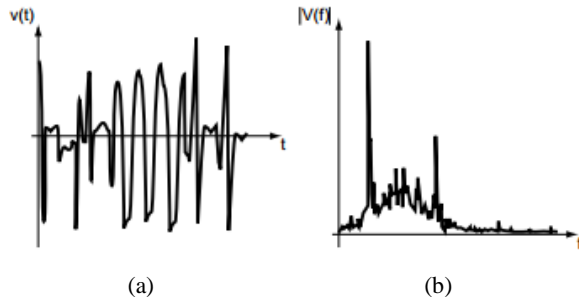
Sinyal feroresonansi jenis ini tidak periodik. Spektrum sinyalnya merupakan diskontinyu, didefinisikan sebagai  $nf_1 + mf_2$  ( $n$  dan  $m$  adalah integer dan  $f_1/f_2$  merupakan nilai real irasional)



**Gambar 2.9** *Quasi-Periodic Ferroresonance* (a) Sinyal periodik  
(b) spektrum sinyal

d. *Chaotic Ferroresonance*

Feroresonansi jenis ini memiliki spektrum sinyal non-periodik dan kontinyu. Sinyal ini tidak dapat diinterupsi oleh frekuensi apapun dan berbentuk tidak teratur (*chaos*).



**Gambar 2.10** *Chaotic Ferroresonance* a) Sinyal periodik (b) spektrum sinyal

### 2.3.5 Gejala-gejala Feroresonansi

Untuk dapat mendeteksi adanya feroresonansi, perlu diketahui beberapa gejala-gejalanya [2]. Baik gejala pada bentuk gelombang maupun bentuk fisiknya. Gejala-gejala dari feroresonansi adalah sebagai berikut:

- Tingkat *overvoltage* tinggi dari antar fasa atau fasa ke tanah yang permanen

- b. Tingkat *overcurrent* tinggi
- c. Distorsi atau harmonisa permanen dari gelombang tegangan dan arus
- d. Pemanasan pada transformator pada pola operasi tanpa beban
- e. Suara bising yang keras
- f. Kerusakan pada peralatan listrik akibat *breakdown* pada isolasi dan pelepasan thermal tampak jelas sebelum koordinasi proteksi bekerja

## BAB 3

### PEMODELAN FERORESONANSI

#### 3.1 Pemodelan Rangkaian Feroresonansi

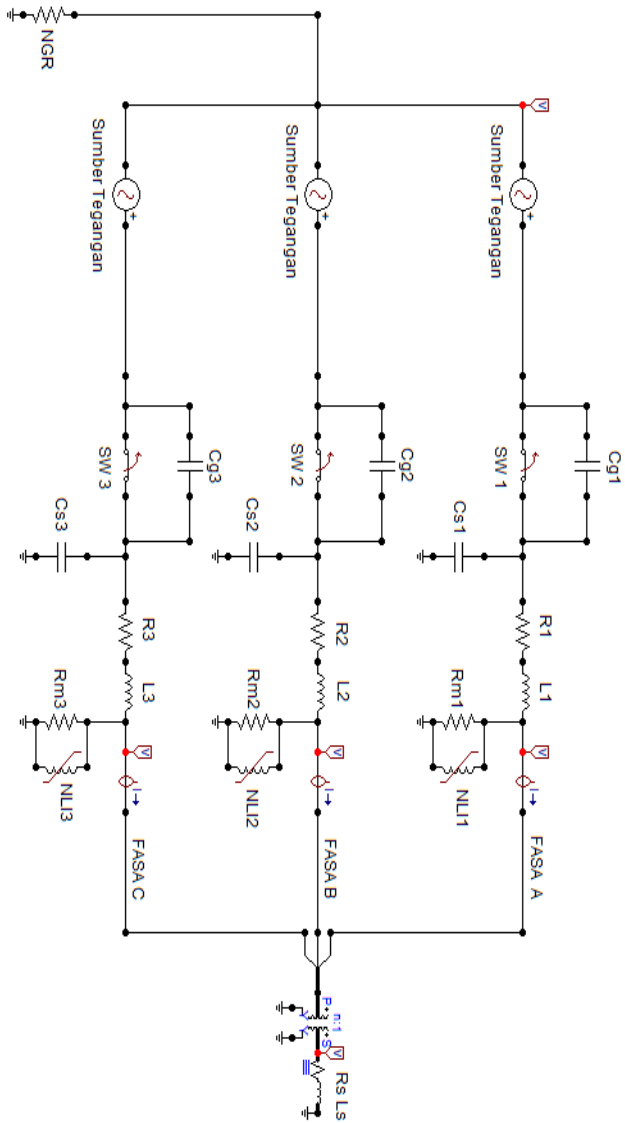
Pemodelan rangkaian ini bertujuan untuk menunjukkan fenomena feroresonansi yang dapat terjadi pada transformator tiga fasa yang tidak simetri akibat perbedaan nilai induktansi nonlinier. Pemodelan rangkaian feroresonansi ini meliputi pemodelan rangkaian dengan *trigger* berupa *switching* serta rangkaian pada kondisi normal sebagai pembanding. Pemodelan rangkaian feroresonansi ini terdiri dari komponen-komponen utama seperti sumber tegangan 150 kV, resistor, kapasitor, *switch*, dan induktor nonlinier. Pemodelan rangkaian dilakukan pada *Alternative Transient Program* atau ATPDraw.

Berdasarkan referensi yang ada, pemodelan feroresonansi pada bagian sistem transmisi menggunakan sumber tegangan senilai 150 kV. Selain itu, terdapat *capacitor grading* dengan interval nilai 0,001 - 10  $\mu\text{F}$  dan *capacitor shunt* dengan interval nilai 0,001 - 10  $\mu\text{F}$ .

Berdasarkan Gambar 3.1 rangkaian pemodelan feroresonansi terdiri dari tiga rangkaian pengganti transformator yang terhubung dengan *grading capacitance* yang diparalelkan dengan *switch* dan *shunt capacitance* yang terhubung ke tanah pada tiap-tiap fasanya. Transformator pada rangkaian tersebut menggunakan model *ideal 3 phase*. Parameter pada rangkaian dapat dilihat pada Tabel 3.1.

**Tabel 3.1** Parameter rangkaian pemodelan feroresonansi

Parameter	Nilai	Satuan
Sumber Tegangan	150	kV
Frekuensi	50	Hz
<i>Grading Capacitance</i> ( $C_{g1}, C_{g2}, C_{g3}$ )	0.008	$\mu\text{F}$
<i>Shunt Capacitance</i> ( $C_{s1}, C_{s2}, C_{s3}$ )	0.008	$\mu\text{F}$
Resistansi Primer ( $R_1, R_2, R_3$ )	220	$\Omega$
Induktansi Primer ( $L_1, L_2, L_3$ )	1,745	mH
Resistansi Sekunder ( $R_s$ )	3	k $\Omega$
Induktansi Sekunder ( $L_s$ )	9	H
Resistansi Magnetisasi ( $R_{m1}, R_{m2}, R_{m3}$ )	650	M $\Omega$
<i>Neutral Grounding</i> (NGR)	20	$\Omega$
<i>Switching</i> (SW1, SW 2, SW3)	0.2	s



Gambar 3.1 Rangkaian pemodelan feroresonansi transformator tiga fasa

Pada rangkaian pemodelan, terdapat dua kapasitansi pada tiap fasanya. Kapasitansi yang pertama adalah *grading capacitance*. Kapasitansi ini memiliki hubungan paralel dengan induktansi nonlinier. Sedangkan kapasitansi yang kedua adalah *shunt capacitance*. Kapasitansi ini memiliki hubungan seri dengan induktansi nonlinier.

Kondisi ketidaksimetrian pada transformator tiga fasa ini diadopsi dari studi terdahulu tentang pengaruh topologi pemotongan inti pada transformator tiga fasa. Pada studi itu disebutkan bahwa nilai kuat medan magnet (H) pada inti transformator tipe modifikasi lebih besar dibandingkan inti transformator tipe standar. Demikian pula yang terjadi dengan nilai kerapatan medan magnet (B) [1].

Jika dilihat dari kondisi pada dunia industri, ketidaksimetrian pada transformator ini dapat terjadi akibat dari kecacatan isolasi pada transformator, keretakan pada inti transformator, pemakaian yang lama atau faktor penuaan, serta faktor eksternal seperti kelembaban juga dapat mempengaruhi persebaran fluks pada inti dari sebuah transformator. Sehingga menyebabkan ketidaksimetrian pada kurva magnetisasinya.

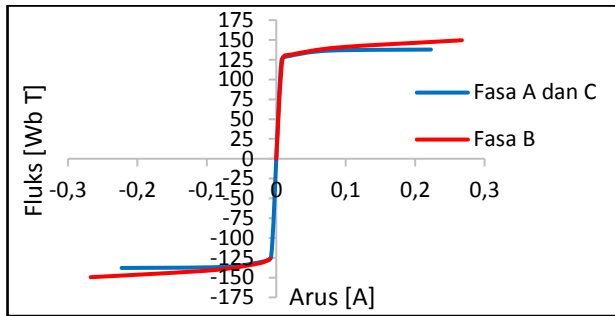
Berdasarkan penjelasan tersebut, pemodelan, feroresonansi pada studi ini menggunakan dua kondisi induktansi nonlinier yang berbeda. Fasa A dan fasa C memiliki nilai induktansi nonlinier yang sama. Sedangkan pada fasa B digunakan kondisi induktansi nonlinier yang berbeda dari fasa A dan fasa C. Nilai dari induktansi nonlinier pada fasa B memiliki nilai fluks dan arus yang lebih tinggi dibandingkan dengan induktansi nonlinier pada fasa A dan fasa C.

**Tabel 3.2** Parameter kurva magnetisasi pada fasa A dan fasa C

<b>I (A)</b>	<b>Fluks (Wb T)</b>
0.00745	123.79
0.018562	129.59
0.0745246	136.45
0.222739	137.82

**Tabel 3.3** Parameter kurva magnetisasi pada fasa B

<b>I (A)</b>	<b>Fluks (Wb T)</b>
0.00894	125.983
0.02227	131.522
0.08943	140.528
0.26729	149.535



**Gambar 3.2** Kurva magnetisasi pada ketiga fasa

### 3.2 Pengambilan Data

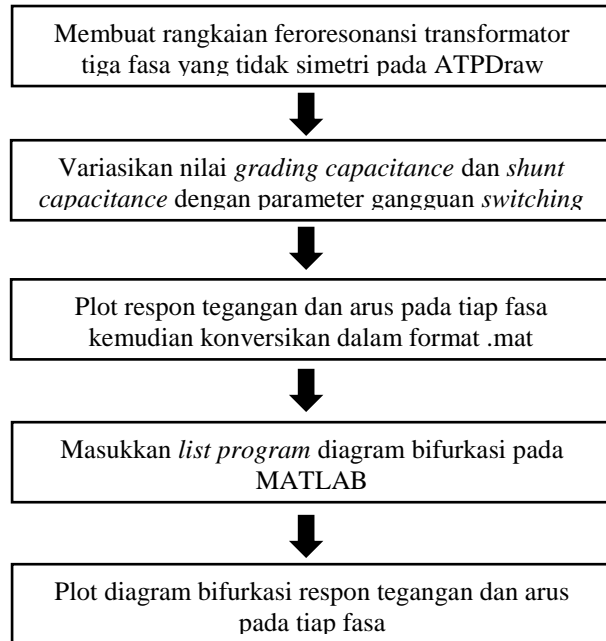
Proses pengambilan data pada studi ini dilakukan dengan menggunakan perangkat lunak berupa ATPDraw. ATPDraw merupakan perangkat lunak yang digunakan untuk melakukan simulasi rangkaian pemodelan dengan fenomena transien. Pada simulasi ini, terdapat dua kondisi yaitu saat kondisi normal dan kondisi akibat *switching*. Dengan pemberian variasi nilai pada kapasitansi yang sesuai untuk rangkaian pemodelan, didapatkan data feroresonansi untuk tiap variasi nilai kapasitansi. Data yang diambil adalah data berupa bentuk respon tegangan dan arus tiap fasa pada sisi primer transformator daya untuk setiap variasi nilai kapasitansi dengan interval nilai 0,001 – 10  $\mu\text{F}$ .

### 3.3 Pengolahan Data

Proses pengolahan data pada studi ini dilakukan dengan menggunakan MATLAB. Setelah mendapatkan data hasil respon tegangan dan arus pada sisi primer dengan menggunakan ATPDraw, konversikan plot tersebut ke dalam format MATLAB. Kemudian masukkan list program untuk menampilkan diagram bifurkasi pada MATLAB.

Diagram bifurkasi digunakan untuk melihat persebaran nilai yang ada pada suatu sistem dalam interval tertentu dengan adanya perubahan salah satu variabel pada sistem tersebut, yang nantinya akan berdampak kepada kestabilan sistem itu sendiri. Teknik bifurkasi dapat menentukan area yang berisiko mengalami feroresonansi bila ada parameter yang

bervariasi. Diagram bifurkasi dapat meramalkan fenomena lonjakan spontan yang akan terjadi pada sistem. Pada studi ini, sumbu X pada diagram bifurkasi menunjukkan nilai tegangan atau arus. Sedangkan sumbu Y menunjukkan kode simulasi data.



**Gambar 3.3** *Flowchart* pengambilan dan pengolahan data

*---Halaman ini sengaja dikosongkan---*



## BAB 4

### ANALISIS HASIL SIMULASI FERORESONANSI PADA TRANSFORMATOR TIGA FASA YANG TIDAK SIMETRI

#### 4.1 Kondisi Normal

Simulasi rangkaian pemodelan feroresonansi pada saat kondisi normal memiliki sumber tegangan senilai 150 kV. Simulasi berlangsung selama 0,5 sekon. Pada saat kondisi normal, tidak ada proses *switching* pada rangkaian sehingga tidak terjadi fenomena feroresonansi. Hasil respon tegangan dan arus yang terlihat pada simulasi ATPDraw merupakan keadaan *steady state*. Berdasarkan hasil respon tegangan dan arus pada simulasi terdapat perbedaan sudut fasa senilai 120°.

Pada kondisi ini, variasi nilai dari *grading capacitance* dan *shunt capacitance* dapat diabaikan karena belum ada proses *switching*. Hasil dari simulasi kondisi normal dapat dijadikan sebagai respon pembanding dengan simulasi menggunakan gangguan *switching*.

Sumber tegangan yang digunakan adalah tegangan bolak-balik (AC) rms *line-line* ( $V_{L-Lrms}$ ) 150 kV, 50 Hz. Sehingga nilai tegangan *line-netral* ( $V_{L-Nrms}$ ) pada tiap fasa adalah:

$$V_{L-Nrms} = \frac{V_{L-Lrms}}{\sqrt{3}} \quad (4.1)$$

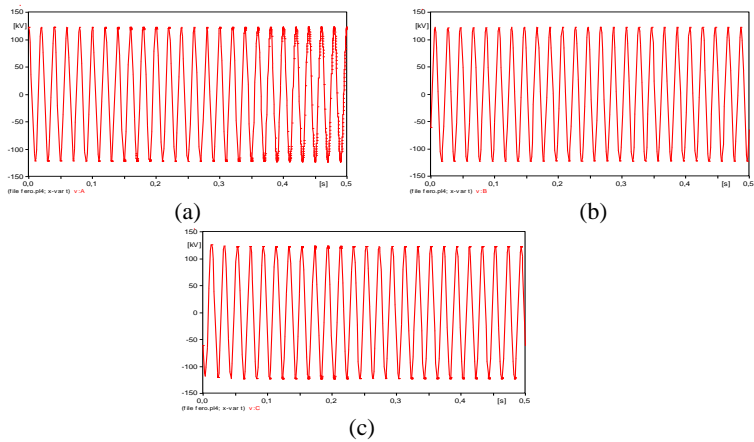
$$V_{L-Nrms} = \frac{150000 \text{ V}}{\sqrt{3}} = 86602,5 \text{ V}$$

Tegangan puncak *line-netral* ( $V_{peakL-netral}$ ) pada tiap fasa adalah:

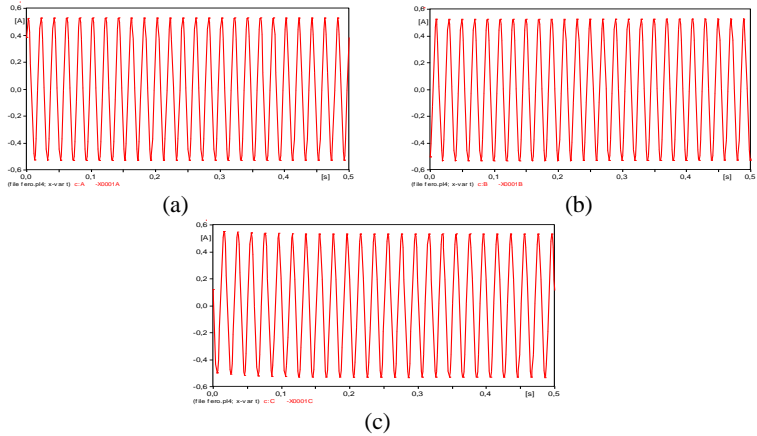
$$V_{L-Npeak} = V_{L-Nrms} \times \sqrt{2} \quad (4.2)$$

$$V_{L-Npeak} = 86602,5 \times \sqrt{2} = 122474,5 \text{ V}$$

Gambar 4.1 merupakan respon tegangan pada saat kondisi normal pada setiap fasa. Tegangan puncak hasil simulasi sudah sesuai dengan hasil perhitungan sebelumnya. Sedangkan Gambar 4.2 merupakan respon arus pada saat kondisi normal pada setiap fasa. Arus puncak hasil simulasi menunjukkan nilai sebesar 0,5248 A. Terlihat pada respon tegangan dan arus pada kondisi normal masih berbentuk sinusoidal. Tidak terdapat kecacatan dalam bentuk gelombangnya. Hal ini disebabkan karena tidak adanya salah satu pemicu dari feroresonansi yaitu *switching*.



**Gambar 4.1** Respon tegangan fasa A (a) Respon tegangan fasa B (b) Respon tegangan fasa C (c) pada saat kondisi normal



**Gambar 4.2** Respon arus fasa A (a) Respon arus fasa B (b) Respon arus fasa C (c) pada saat kondisi normal

## 4.2 Feroresonansi Akibat *Switching*

Pada studi ini akan disimulasikan rangkaian pemodelan feroresonansi dengan *trigger* berupa *switching* untuk memicu munculnya feroresonansi. Pada simulasi ini, diberikan gangguan berupa *switching* yang akan terbuka pada waktu ke 0,2 sekon dengan total waktu simulasi

selama 1 sekon. Pengoperasian *switching* ini dilakukan secara serentak pada ketiga fasa dengan waktu yang sama. Dengan adanya pemicu tersebut, akan terlihat fenomena feroresonansi pada rangkaian pemodelan. Sehingga dapat terlihat keadaan abnormal dari feroresonansi.

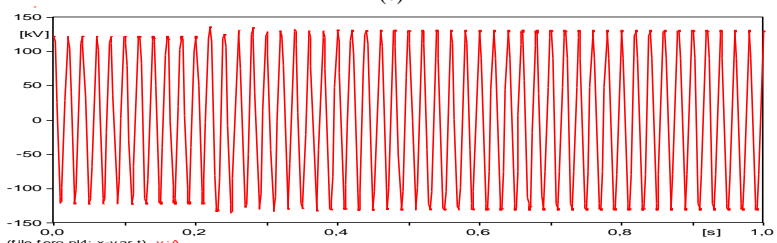
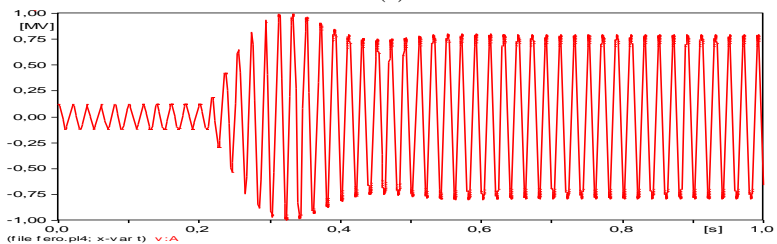
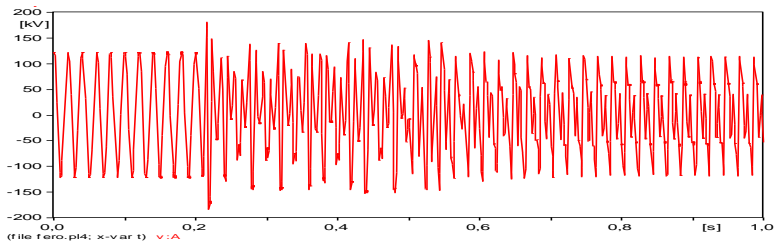
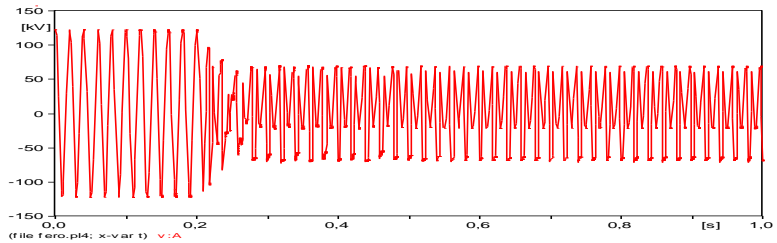
Pada simulasi ini, terdapat dua kapasitansi yang akan divariasikan. Kapasitansi pertama adalah *grading capacitance* dan kapasitansi kedua adalah *shunt capacitance*. Nilai dari kapasitansi ada pada interval 0,001 – 10  $\mu\text{F}$ . Sehingga terdapat 37 variasi nilai pada tiap fasanya. Simulasi ini terbagi menjadi dua respon, yaitu respon tegangan dan respon arus.

#### 4.2.1 Feroresonansi Akibat Variasi *Grading Capacitance* ( $C_g$ )

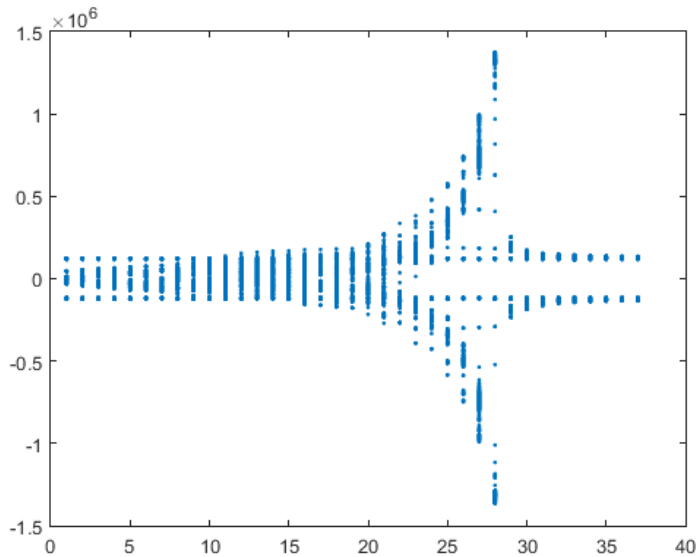
$C_g$  atau *grading capacitance* merupakan kapasitansi yang muncul akibat fenomena pemutusan daya dari *circuit breaker*. Pada simulasi ini, nilai  $C_g$  divariasikan dengan interval nilai 0,001 – 10  $\mu\text{F}$  dan nilai  $C_s$  dibiarkan tetap 0,008  $\mu\text{F}$ . Pada kenyataannya, nilai dari *grading capacitance* ini bisa bervariasi karena memang nilainya berbeda-beda pada saat pengoperasian *circuit breaker*.

##### a. Tegangan pada fasa A

Gambar 4.3 merupakan hasil plot respon tegangan pada fasa A menggunakan perangkat lunak ATPDraw. Plot-plot tersebut menghasilkan beberapa karakteristik feroresonansi. Contoh feroresonansi dengan *Quasiperiodic mode* muncul pada saat nilai  $C_g$  0,009  $\mu\text{F}$ , *Chaotic mode* muncul pada saat nilai  $C_g$  0,09  $\mu\text{F}$ , dan *Subharmonic mode* muncul pada saat nilai  $C_g$  0,9  $\mu\text{F}$ . Sedangkan feroresonansi tidak muncul pada saat nilai  $C_g$  9  $\mu\text{F}$ . Gambar 4.4 merupakan diagram bifurkasi representasi tegangan pada fasa A. Pada interval 0,001 – 0,004  $\mu\text{F}$  dan 2 – 10  $\mu\text{F}$  tidak terjadi feroresonansi. Hal ini dibuktikan dengan titik-titik pada simulasi data ke-1 sampai dengan ke-4 dan simulasi data ke-29 sampai dengan ke-37. Feroresonansi tipe *Fundamental* terdapat pada interval 0,005 – 0,006  $\mu\text{F}$  dan 0,2 – 0,6  $\mu\text{F}$ . Hal tersebut dibuktikan dengan bentuk titik-titik pada simulasi data ke-5 sampai dengan ke-6 dan simulasi data ke-20 sampai dengan ke-24. Feroresonansi tipe lain seperti *Subharmonic* atau *Quasi-periodic* juga terdapat pada interval 0,007 – 0,05  $\mu\text{F}$ , nilai 0,08  $\mu\text{F}$ , nilai 0,1  $\mu\text{F}$ , dan interval 0,7 - 1  $\mu\text{F}$ . Hal tersebut dibuktikan dengan bentuk titik-titik pada simulasi data ke-7 sampai dengan ke-14, data ke-17, data ke-19, dan simulasi data ke-25 sampai dengan data ke-28. Feroresonansi tipe *Chaotic* muncul pada interval 0,06 – 0,07  $\mu\text{F}$  dan 0,09  $\mu\text{F}$ . Hal ini dibuktikan dengan adanya titik-titik pada simulasi data ke-15, data ke-16, dan data ke-18.



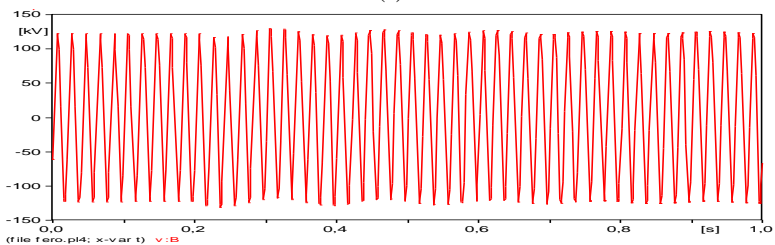
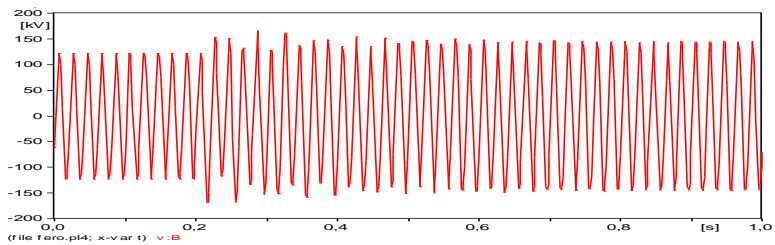
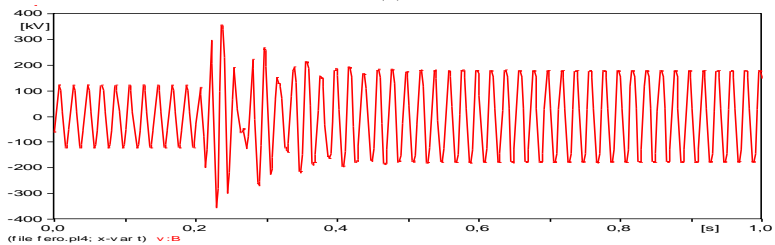
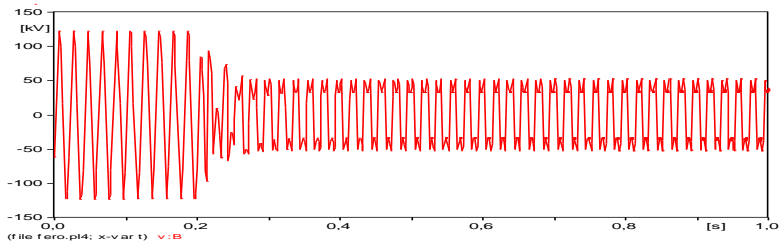
**Gambar 4.3** Respon tegangan dengan  $C_g$  0,009  $\mu\text{F}$  (a) Respon tegangan dengan  $C_g$  0,09  $\mu\text{F}$  (b) Respon tegangan dengan  $C_g$  0,9  $\mu\text{F}$  (c) Respon tegangan dengan  $C_g$  9  $\mu\text{F}$  (d) pada fasa A



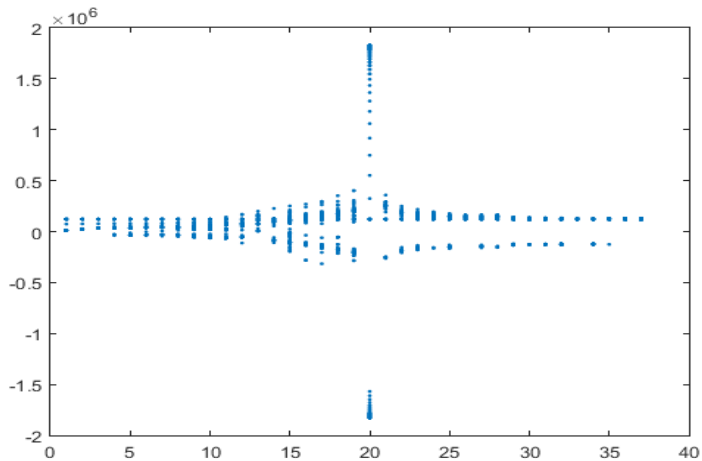
**Gambar 4.4** Diagram bifurkasi tegangan pada fasa A

b. Tegangan pada fasa B

Gambar 4.5 merupakan hasil plot respon tegangan pada tegangan fasa B menggunakan perangkat lunak ATPDraw. Plot-plot tersebut menghasilkan beberapa karakteristik feroresonansi. Contoh feroresonansi dengan *Fundamental mode* muncul pada saat nilai  $C_g$  0,009  $\mu\text{F}$  dan 0,09  $\mu\text{F}$ . Sedangkan feroresonansi tidak muncul pada saat nilai  $C_g$  0,9  $\mu\text{F}$  dan 9  $\mu\text{F}$ . Gambar 4.6 merupakan diagram bifurkasi representasi tegangan pada fasa B. Diagram bifurkasi tersebut memperlihatkan bahwa pada interval 0,001 – 0,004  $\mu\text{F}$  dan 0,2 – 10  $\mu\text{F}$  tidak terjadi feroresonansi. Hal ini dibuktikan dengan titik-titik pada simulasi data ke-1 sampai dengan ke-3 dan simulasi data ke-20 sampai dengan ke-37. Feroresonansi tipe *Fundamental* muncul pada interval 0,005 – 0,03  $\mu\text{F}$  dan 0,05 – 0,1  $\mu\text{F}$ . Hal ini ditunjukkan dengan titik-titik pada simulasi data ke-5 sampai dengan ke-12 dan simulasi data ke-14 sampai dengan ke-19. Feroresonansi tipe *Subharmonic* atau *Quasi-periodic* terdapat pada 0,004  $\mu\text{F}$ . Hal tersebut dibuktikan dengan bentuk titik-titik pada simulasi data ke-4. Feroresonansi tipe *Chaotic* tidak muncul pada tegangan di fasa B.



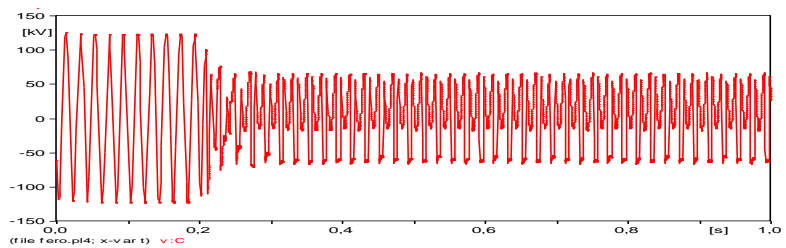
**Gambar 4.5** Respon tegangan dengan  $C_g$  0,009  $\mu\text{F}$  (a) Respon tegangan dengan  $C_g$  0,09  $\mu\text{F}$  (b) Respon tegangan dengan  $C_g$  0,9  $\mu\text{F}$  (c) Respon tegangan dengan  $C_g$  9  $\mu\text{F}$  (d) pada fasa B



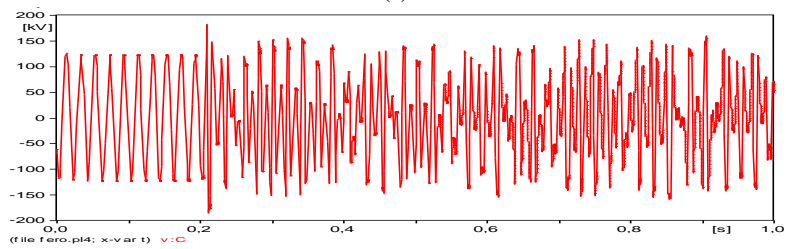
**Gambar 4.6** Diagram bifurkasi tegangan pada fasa B

c. Tegangan pada fasa C

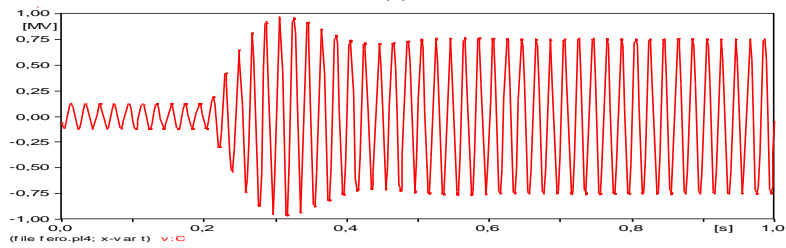
Gambar 4.7 merupakan hasil plot respon tegangan pada fasa C menggunakan perangkat lunak ATPDraw. Plot-plot tersebut menghasilkan beberapa karakteristik feroresonansi. Contoh feroresonansi dengan *Quasiperiodic mode* muncul pada saat nilai  $C_g$  0,009  $\mu\text{F}$ , *Chaotic mode* muncul pada saat nilai  $C_g$  0,09  $\mu\text{F}$ , dan *Subharmonic mode* muncul pada saat nilai  $C_g$  0,9  $\mu\text{F}$ . Sedangkan feroresonansi tidak muncul pada saat nilai  $C_g$  9  $\mu\text{F}$ . Gambar 4.8 merupakan diagram bifurkasi representasi tegangan pada fasa C. Pada interval 0,001 – 0,004  $\mu\text{F}$  dan 2 – 10  $\mu\text{F}$  tidak terjadi feroresonansi. Hal ini dibuktikan dengan titik-titik pada simulasi data ke-1 sampai ke-4 dan simulasi data ke-29 sampai ke-37. Feroresonansi tipe *Fundamental* terdapat pada interval 0,005 – 0,006  $\mu\text{F}$  dan 0,2 – 0,6  $\mu\text{F}$ . Hal tersebut dibuktikan dengan bentuk titik-titik pada simulasi data ke-5 sampai ke-6 dan simulasi data ke-20 sampai ke-24. Feroresonansi tipe lain seperti *Subharmonic* atau *Quasi-periodic* juga terdapat pada interval 0,007 – 0,05  $\mu\text{F}$ , nilai 0,08  $\mu\text{F}$ , nilai 0,1  $\mu\text{F}$ , dan interval 0,7 - 1  $\mu\text{F}$ . Hal tersebut dibuktikan dengan bentuk titik-titik pada simulasi data ke-7 sampai ke-14, data ke-17, data ke-19, dan simulasi data ke-25 sampai ke-28. Feroresonansi tipe *Chaotic* muncul pada interval 0,06 – 0,07  $\mu\text{F}$  dan 0,09  $\mu\text{F}$ . Hal ini dibuktikan dengan adanya titik-titik pada simulasi data ke-15, data ke-16, dan data ke-18.



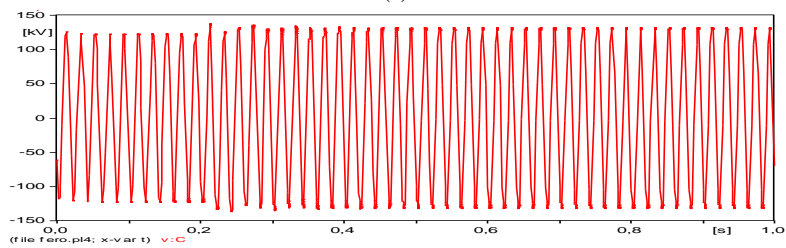
(a)



(b)



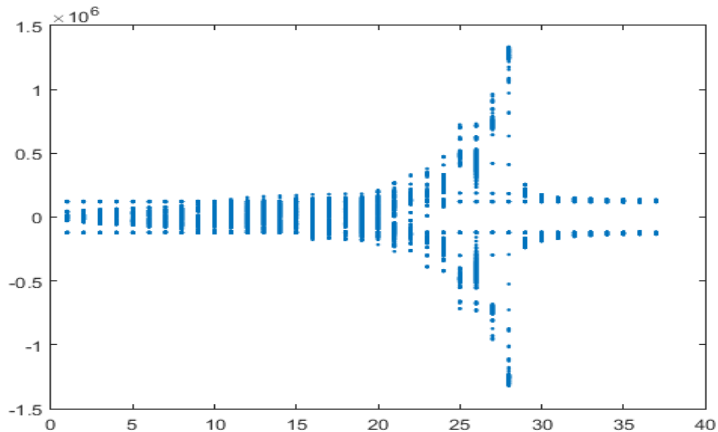
(c)



(d)

**Gambar 4.7** Respon tegangan dengan  $C_g$  0,009  $\mu\text{F}$  (a) Respon tegangan dengan  $C_g$  0,09  $\mu\text{F}$  (b) Respon tegangan dengan  $C_g$  0,9  $\mu\text{F}$  (c) Respon tegangan dengan  $C_g$  9  $\mu\text{F}$  (d) pada fasa C

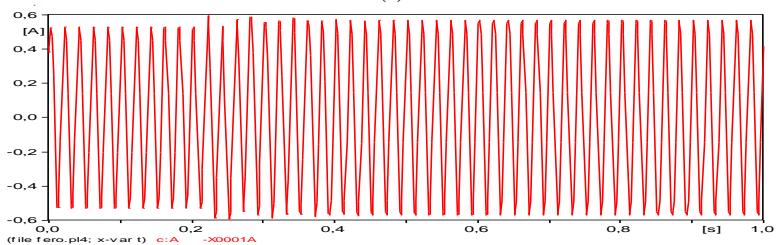
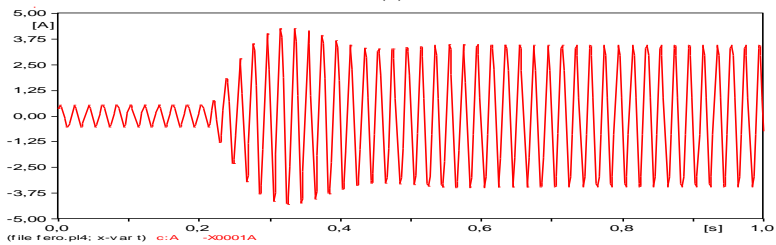
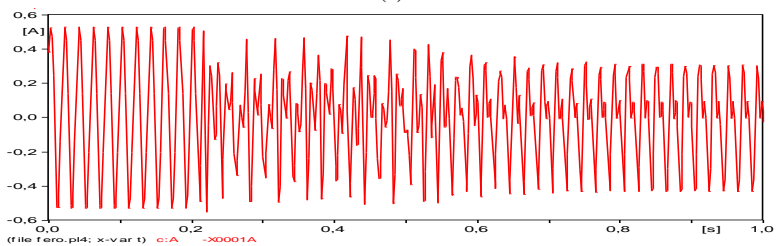
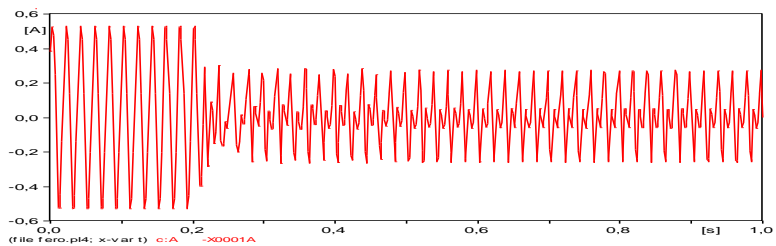




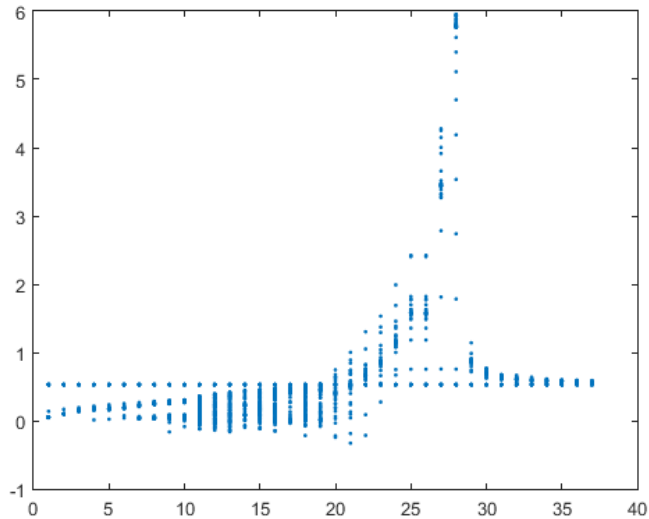
**Gambar 4.8** Diagram bifurkasi tegangan pada fasa C

d. Arus pada fasa A

Gambar 4.9 merupakan hasil plot respon arus pada fasa A menggunakan perangkat lunak ATPDraw. Plot-plot tersebut menghasilkan beberapa karakteristik feroresonansi. Contoh feroresonansi dengan *Quasiperiodic mode* muncul pada saat nilai  $C_g$   $0,009 \mu\text{F}$ , *Chaotic mode* muncul pada saat nilai  $C_g$   $0,9 \mu\text{F}$ , dan *Subharmonic mode* muncul pada saat nilai  $C_g$   $9 \mu\text{F}$ . Sedangkan feroresonansi tidak muncul pada saat nilai  $C_g$   $9 \mu\text{F}$ . Gambar 4.10 merupakan diagram bifurkasi representasi arus pada fasa A. Pada interval  $0,001 - 0,004 \mu\text{F}$  dan  $2 - 10 \mu\text{F}$  tidak terjadi feroresonansi. Hal ini dibuktikan dengan titik-titik pada simulasi data ke-1 sampai dengan ke-4 dan simulasi data ke-29 sampai dengan ke-37. Feroresonansi tipe *Fundamental* terdapat pada interval  $0,005 - 0,006 \mu\text{F}$  dan  $0,2 - 0,6 \mu\text{F}$ . Hal tersebut dibuktikan dengan bentuk titik-titik pada simulasi data ke-5 sampai dengan ke-6 dan simulasi data ke-20 sampai dengan ke-24. Feroresonansi tipe lain seperti *Subharmonic* atau *Quasi-periodic* juga terdapat pada interval  $0,007 - 0,05 \mu\text{F}$ , nilai  $0,08 \mu\text{F}$ , nilai  $0,1 \mu\text{F}$ , dan interval  $0,7 - 1 \mu\text{F}$ . Hal tersebut dibuktikan dengan bentuk titik-titik pada simulasi data ke-7 sampai dengan ke-14, data ke-17, data ke-19, dan simulasi data ke-25 sampai dengan data ke-28. Feroresonansi tipe *Chaotic* muncul pada interval  $0,06 - 0,07 \mu\text{F}$  dan  $0,09 \mu\text{F}$ . Hal ini dibuktikan dengan adanya titik-titik pada simulasi data ke-15, data ke-16, dan data ke-18.



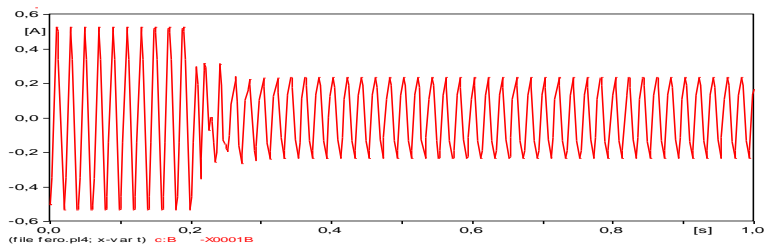
**Gambar 4.9** Respon arus dengan  $C_g$  0,009  $\mu\text{F}$  (a) Respon arus dengan  $C_g$  0,09  $\mu\text{F}$  (b) Respon arus dengan  $C_g$  0,9  $\mu\text{F}$  (c) Respon arus dengan  $C_g$  9  $\mu\text{F}$  (d) pada fasa A



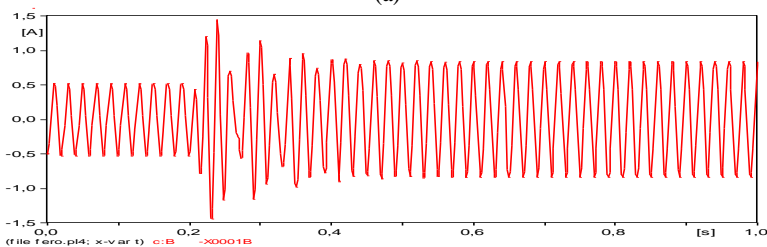
**Gambar 4.10** Diagram bifurkasi arus pada fasa A

e. Arus pada fasa B

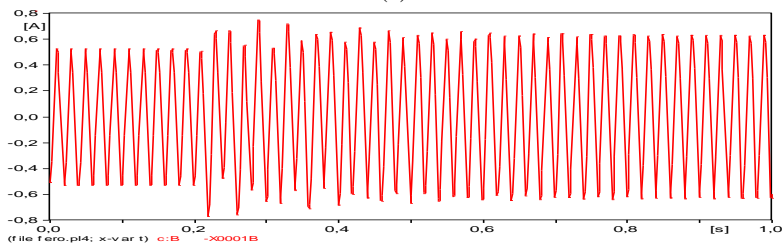
Gambar 4.11 merupakan hasil plot respon arus pada tegangan fasa B menggunakan perangkat lunak ATPDraw. Plot-plot tersebut menghasilkan beberapa karakteristik feroresonansi. Contoh feroresonansi dengan *Fundamental mode* muncul pada saat nilai  $C_g$  0,009  $\mu\text{F}$  dan 0,09  $\mu\text{F}$ . Sedangkan feroresonansi tidak muncul pada saat nilai  $C_g$  0,9  $\mu\text{F}$  dan 9  $\mu\text{F}$ . Gambar 4.12 merupakan diagram bifurkasi representasi arus pada fasa B. Diagram bifurkasi tersebut memperlihatkan bahwa pada interval 0,001 – 0,004  $\mu\text{F}$  dan 0,2 – 10  $\mu\text{F}$  tidak terjadi feroresonansi. Hal ini dibuktikan dengan titik-titik pada simulasi data ke-1 sampai dengan ke-3 dan simulasi data ke-20 sampai dengan ke-37. Feroresonansi tipe *Fundamental* muncul pada interval 0,005 – 0,03  $\mu\text{F}$  dan 0,05 – 0,1  $\mu\text{F}$ . Hal ini ditunjukkan dengan titik-titik pada simulasi data ke-5 sampai dengan ke-12 dan simulasi data ke-14 sampai dengan ke-19. Feroresonansi tipe *Subharmonic* atau *Quasi-periodic* terdapat pada 0,004  $\mu\text{F}$ . Hal tersebut dibuktikan dengan bentuk titik-titik pada simulasi data ke-4. Feroresonansi tipe *Chaotic* tidak muncul pada tegangan di fasa B.



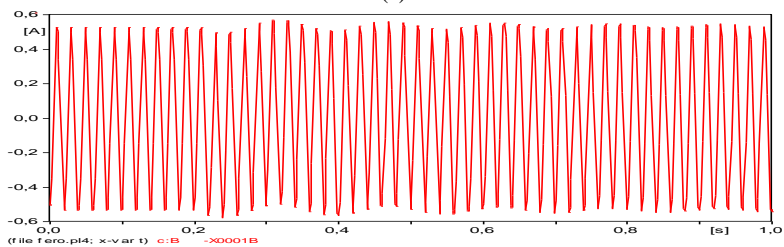
(a)



(b)

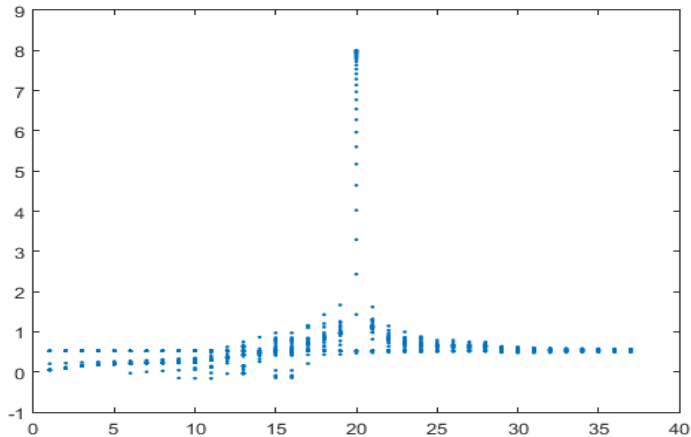


(c)



(d)

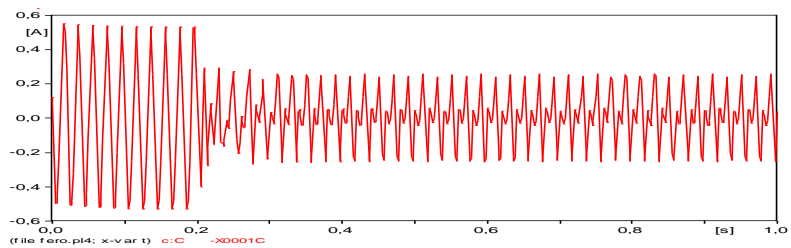
**Gambar 4.11** Respon arus dengan  $C_g$  0,009  $\mu\text{F}$  (a) Respon arus dengan  $C_g$  0,09  $\mu\text{F}$  (b) Respon arus dengan  $C_g$  0,9  $\mu\text{F}$  (c) Respon arus dengan  $C_g$  9  $\mu\text{F}$  (d) pada fasa C



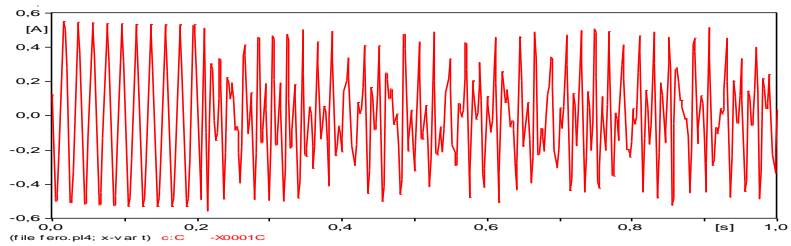
**Gambar 4.12** Diagram bifurkasi arus pada fasa B

f. Arus pada fasa C

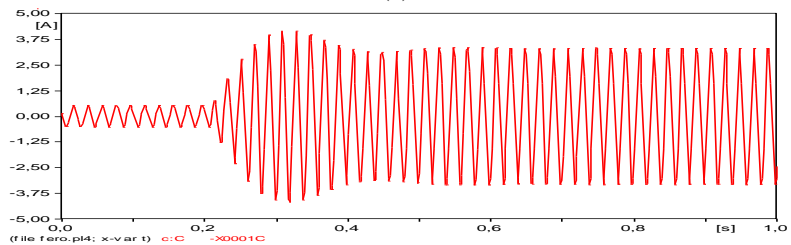
Gambar 4.13 merupakan hasil plot respon arus pada fasa C menggunakan perangkat lunak ATPDraw. Plot-plot tersebut menghasilkan beberapa karakteristik feroresonansi. Contoh feroresonansi dengan *Quasiperiodic mode* muncul pada saat nilai  $C_g$   $0,009 \mu\text{F}$ , *Chaotic mode* muncul pada saat nilai  $C_g$   $0,09 \mu\text{F}$ , dan *Subharmonic mode* muncul pada saat nilai  $C_g$   $0,9 \mu\text{F}$ . Sedangkan feroresonansi tidak muncul pada saat nilai  $C_g$   $9 \mu\text{F}$ . Gambar 4.14 merupakan diagram bifurkasi representasi arus pada fasa C. Pada interval  $0,001 - 0,004 \mu\text{F}$  dan  $2 - 10 \mu\text{F}$  tidak terjadi feroresonansi. Hal ini dibuktikan dengan titik-titik pada simulasi data ke-1 sampai dengan ke-4 dan simulasi data ke-29 sampai dengan ke-37. Feroresonansi tipe *Fundamental* terdapat pada interval  $0,005 - 0,006 \mu\text{F}$  dan  $0,2 - 0,6 \mu\text{F}$ . Hal tersebut dibuktikan dengan bentuk titik-titik pada simulasi data ke-5 sampai dengan ke-6 dan simulasi data ke-20 sampai dengan ke-24. Feroresonansi tipe lain seperti *Subharmonic* atau *Quasi-periodic* juga terdapat pada interval  $0,007 - 0,05 \mu\text{F}$ , nilai  $0,08 \mu\text{F}$ , nilai  $0,1 \mu\text{F}$ , dan interval  $0,7 - 1 \mu\text{F}$ . Hal tersebut dibuktikan dengan bentuk titik-titik pada simulasi data ke-7 sampai dengan ke-14, data ke-17, data ke-19, dan simulasi data ke-25 sampai dengan data ke-28. Feroresonansi tipe *Chaotic* muncul pada interval  $0,06 - 0,07 \mu\text{F}$  dan  $0,09 \mu\text{F}$ . Hal ini dibuktikan dengan adanya titik-titik pada simulasi data ke-15, data ke-16, dan data ke-18.



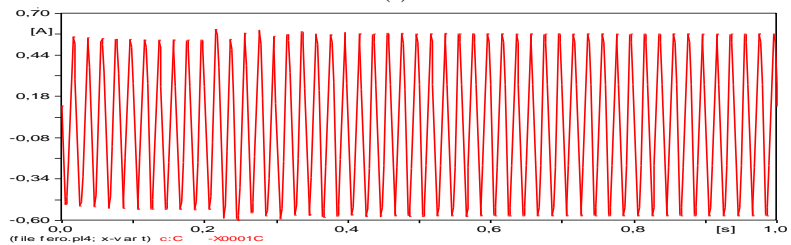
(a)



(b)

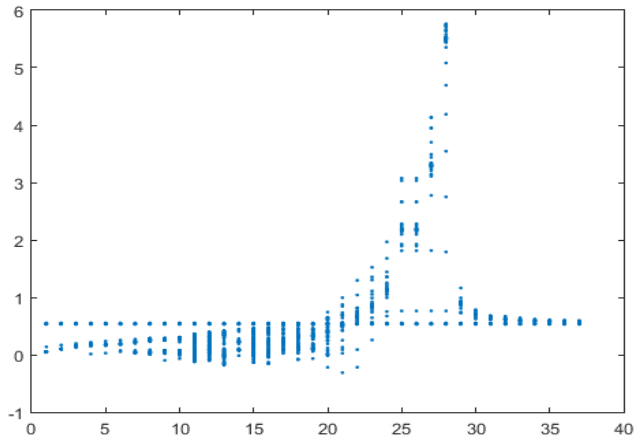


(c)



(d)

**Gambar 4.13** Respon arus dengan  $C_g$  0,009  $\mu\text{F}$  (a) Respon arus dengan  $C_g$  0,09  $\mu\text{F}$  (b) Respon arus dengan  $C_g$  0,9  $\mu\text{F}$  (c) Respon arus dengan  $C_g$  9  $\mu\text{F}$  (d) pada fasa C



**Gambar 4.14** Diagram bifurkasi arus pada fasa C

Perbandingan hasil deteksi feroresonansi pada respon tegangan pada tiap fasa akibat variasi nilai *grading capacitance* dapat dilihat pada Tabel 4.1 dan untuk respon arus dapat dilihat pada Tabel 4.2. Berdasarkan Tabel 4.1 dan Tabel 4.2 terlihat bahwa hasil pada respon tegangan dan arus memiliki karakteristik yang sama pada nilai *grading capacitance* yang sama. Pada fasa A dan C terlihat bahwa feroresonansi terjadi pada interval  $0.005 - 1 \mu\text{F}$ . Sedangkan pada fasa B terlihat bahwa feroresonansi terjadi pada interval  $0,005 - 0,1 \mu\text{F}$ . Perbedaan munculnya feroresonansi pada fasa B terjadi karena adanya perbedaan parameter pada kurva magnetisasi. Kesimpulan berdasarkan plot-plot dan diagram bifurkasi sebelumnya adalah pengubahan nilai kapasitansi saluran pada *grading capacitance* mempengaruhi kemunculan feroresonansi dan karakteristik transformator tiga fasa yang tidak simetri pada respon tegangan dan arus di setiap fasa. Hasil respon tegangan dan respon arus pada fasa A dan C menghasilkan nilai dan karakteristik yang sama. Hal ini terjadi karena adanya nilai induktansi nonlinier yang sama pada fasa tersebut. Berbeda dengan fasa B yang memiliki perbedaan induktansi nonlinier dengan fasa-fasa lainnya. Sehingga dapat disimpulkan juga bahwa perbedaan sudut fasa dengan nilai induktansi nonlinier yang sama tidak mempengaruhi perubahan nilai *grading capacitance* pada rangkaian simulasi.

**Tabel 4.1** Perbandingan hasil deteksi ferroresonansi pada respon tegangan

Karakteristik	Nilai <i>grading capacitance</i> pada respon tegangan ( $\mu\text{F}$ )		
	VA	VB	VC
Tidak Ferroresonansi	0,001-0,004 2 – 10	0,001 – 0,004 0,2 – 10	0,001-0,004 2 – 10
<i>Fundamental mode</i>	0,005 - 0,006 0,2 - 0,6	0,005 - 0,03 0,05 - 0,1	0,005 - 0,006 0,2 - 0,6
<i>Subharmonic mode</i>	0,007 - 0,01 dan 0,7 - 1 0,05 ; 0,08 ; 0,1	0,04	0,007 - 0,01 dan 0,7 - 1 0,05 ; 0,08 ; 0,1
<i>Quasi-Periodic mode</i>	0,02 - 0,04	tidak ada	0,02 - 0,04
<i>Chaotic mode</i>	0,06 - 0,07 0,09	tidak ada	0,06 - 0,07 0,09

**Tabel 4.2** Perbandingan hasil deteksi ferroresonansi pada respon arus

Karakteristik	Nilai <i>grading capacitance</i> pada respon arus ( $\mu\text{F}$ )		
	IA	IB	IC
Tidak Ferroresonansi	0,001-0,004 2 – 10	0,001 – 0,004 0,2 – 10	0,001-0,004 2 – 10
<i>Fundamental mode</i>	0,005 - 0,006 0,2 - 0,6	0,005 - 0,03 0,05 - 0,1	0,005 - 0,006 0,2 - 0,6
<i>Subharmonic mode</i>	0,007 - 0,01 dan 0,7 - 1 0,05 ; 0,08 ; 0,1	0,04	0,007 - 0,01 dan 0,7 - 1 0,05 ; 0,08 ; 0,1
<i>Quasi-Periodic mode</i>	0,02 - 0,04	tidak ada	0,02 - 0,04
<i>Chaotic mode</i>	0,06 - 0,07 0,09	tidak ada	0,06 - 0,07 0,09



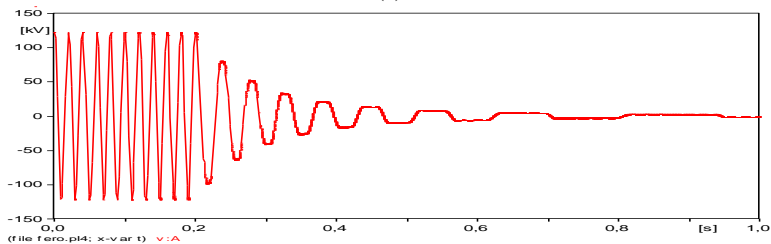
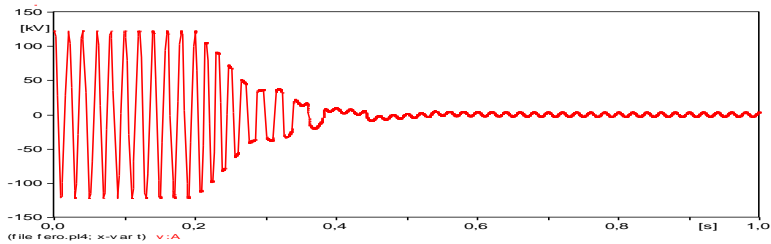
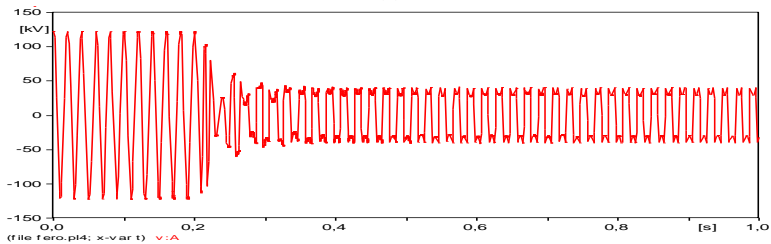
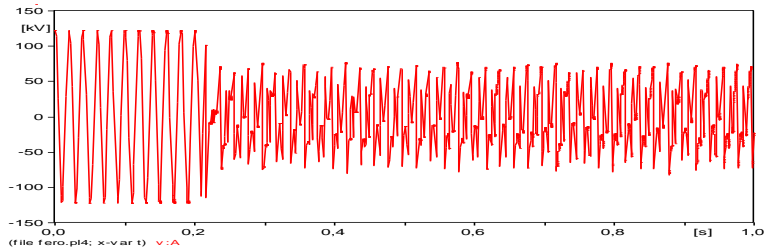
Pada diagram bifurkasi dari variasi *grading capacitance*, terlihat bahwa terdapat beberapa titik dimana muncul *overvoltage*. Hal ini terjadi karena adanya pengaruh dari rangkaian feroresonansi paralel yang terlihat pada rangkaian pemodelan. Hubungan antara *grading capacitance* dan induktansi nonlinier pada rangkaian pemodelan menunjukkan hubungan paralel. Sehingga dari rangkaian tersebut dapat dihasilkan feroresonansi dengan respon gelombang *overvoltage*. Hal ini dipengaruhi oleh nilai induktansi nonlinier yang berpadanan dengan nilai kapasitansi yang divariasikan.

#### 4.2.2 Feroresonansi Akibat Variasi *Shunt Capacitance* ( $C_s$ )

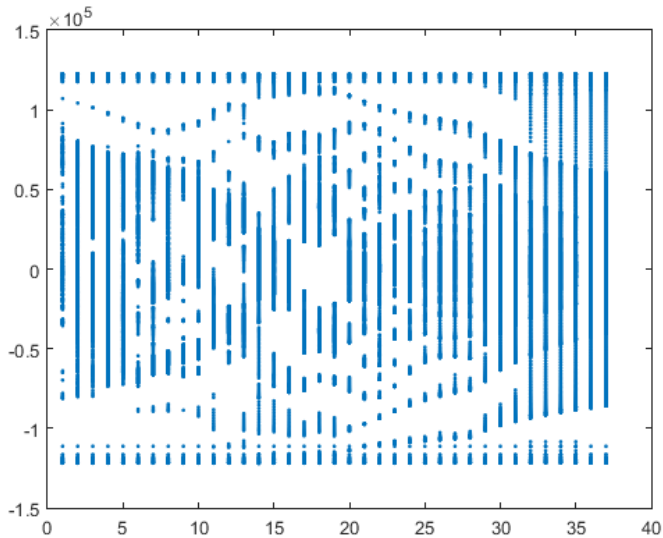
$C_s$  atau *shunt capacitance* merupakan representasi dari nilai kapasitif saluran transmisi terhadap tanah atau biasa disebut dengan istilah *line charging*. Pada simulasi ini, nilai  $C_s$  divariasikan dengan interval nilai  $0,001 - 10 \mu\text{F}$  dan nilai  $C_g$  dibiarkan tetap  $0,008 \mu\text{F}$ . Pada kenyataannya, nilai dari *shunt capacitance* ini bisa bervariasi karena pengaruh dari faktor eksternal seperti kelembaban yang dapat mempengaruhi nilai *line charging* pada saluran transmisi terhadap tanah.

##### a. Tegangan pada fasa A

Gambar 4.15 merupakan hasil plot respon tegangan pada fasa A menggunakan perangkat lunak ATPDraw. Plot-plot tersebut menghasilkan beberapa karakteristik feroresonansi. Contoh feroresonansi dengan *Quasiperiodic mode* muncul pada saat nilai  $C_s$   $0,003 \mu\text{F}$  dan *Fundamental mode* muncul pada saat nilai  $C_s$   $0,03 \mu\text{F}$ . Sedangkan feroresonansi tidak muncul pada saat nilai  $C_s$   $0,3 \mu\text{F}$  dan  $3 \mu\text{F}$ . Gambar 4.16 merupakan diagram bifurkasi representasi tegangan pada fasa A. Pada interval  $0,05 - 0,07 \mu\text{F}$  dan  $0,2 - 10 \mu\text{F}$  tidak terjadi feroresonansi. Hal ini dibuktikan dengan titik-titik pada simulasi data ke-14 sampai dengan ke-16 dan simulasi data ke-20 sampai dengan ke-37. Feroresonansi tipe *Fundamental* terdapat pada interval  $0,004 - 0,006 \mu\text{F}$ ,  $0,008 - 0,04 \mu\text{F}$ , dan  $0,08 - 0,1 \mu\text{F}$ . Hal tersebut dibuktikan dengan bentuk titik-titik pada simulasi data ke-4 sampai dengan ke-6, simulasi data ke-8 sampai dengan data ke-13, dan simulasi data ke-17 sampai dengan ke-19. Feroresonansi tipe lain seperti *Subharmonic* atau *Quasi-periodic* juga terdapat pada interval  $0,001 - 0,003 \mu\text{F}$  dan  $0,007 \mu\text{F}$ . Hal tersebut dibuktikan dengan bentuk titik-titik pada simulasi data ke-1 sampai dengan ke-3 dan simulasi data ke-7. Feroresonansi tipe *Chaotic* tidak muncul pada tegangan di fasa A



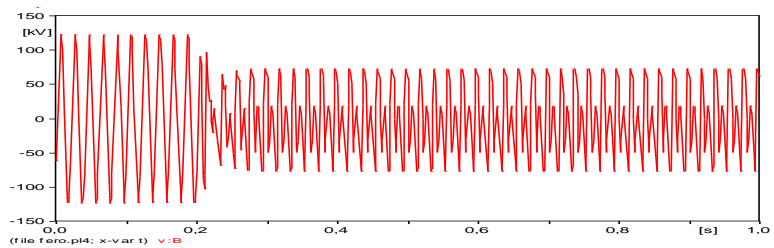
**Gambar 4.15** Respon tegangan dengan  $C_s$  0,003  $\mu\text{F}$  (a) Respon tegangan dengan  $C_s$  0,03  $\mu\text{F}$  (b) Respon tegangan dengan  $C_s$  0,3  $\mu\text{F}$  (c) Respon tegangan dengan  $C_s$  3  $\mu\text{F}$  (d) pada fasa A



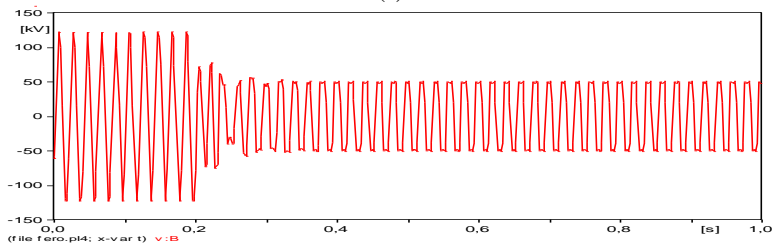
**Gambar 4.16** Diagram bifurkasi tegangan pada fasa A

b. Tegangan pada fasa B

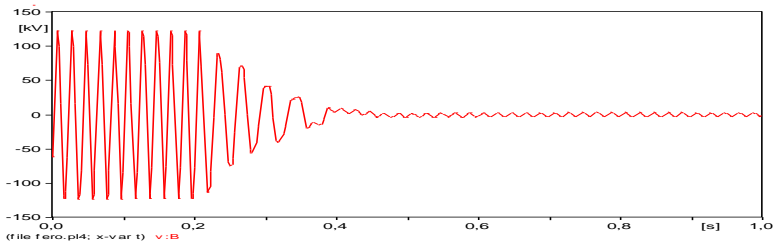
Gambar 4.17 merupakan hasil plot respon tegangan pada fasa B menggunakan perangkat lunak ATPDraw. Plot-plot tersebut menghasilkan beberapa karakteristik feroresonansi. Contoh feroresonansi dengan *Subharmonic mode* muncul pada saat nilai  $C_s$  0,003  $\mu\text{F}$  dan *Fundamental mode* muncul pada saat nilai  $C_s$  0,03  $\mu\text{F}$ . Sedangkan feroresonansi tidak muncul pada saat nilai  $C_s$  0,3  $\mu\text{F}$  dan 3  $\mu\text{F}$ . Gambar 4.18 merupakan diagram bifurkasi representasi tegangan pada fasa B. Diagram bifurkasi tersebut memperlihatkan bahwa pada interval 0,07 - 10  $\mu\text{F}$  tidak terjadi feroresonansi. Hal ini dibuktikan dengan titik-titik pada simulasi data ke-16 sampai dengan ke-37. Feroresonansi tipe *Fundamental* muncul pada interval 0,005 – 0,03  $\mu\text{F}$  dan 0,05 – 0,1  $\mu\text{F}$ . Hal ini ditunjukkan dengan titik-titik pada simulasi data ke-5 sampai dengan ke-12 dan simulasi data ke-14 sampai dengan ke-19. Feroresonansi tipe *Subharmonic* atau *Quasi-periodic* terdapat pada 0,004  $\mu\text{F}$ . Hal tersebut dibuktikan dengan bentuk titik-titik pada simulasi data ke-4. Feroresonansi tipe *Chaotic* tidak muncul pada tegangan di fasa B.



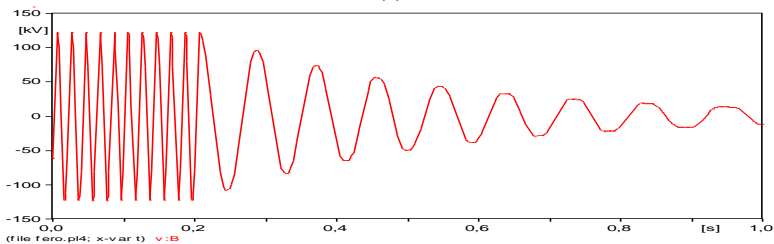
(a)



(b)

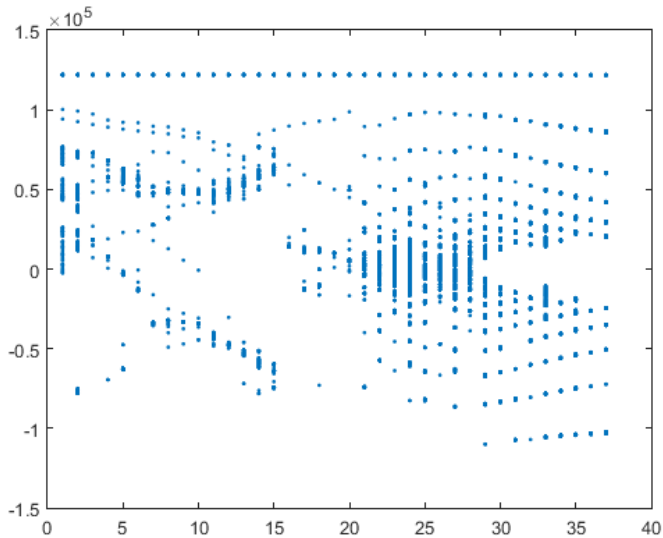


(c)



(d)

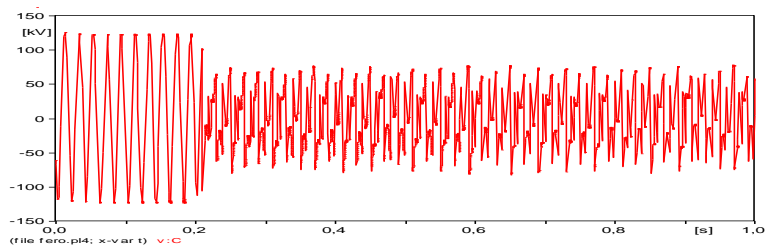
**Gambar 4.17** Respon tegangan dengan  $C_s$  0,003  $\mu F$  (a) Respon tegangan dengan  $C_s$  0,03  $\mu F$  (b) Respon tegangan dengan  $C_s$  0,3  $\mu F$  (c) Respon tegangan dengan  $C_s$  3  $\mu F$  (d) pada fasa B



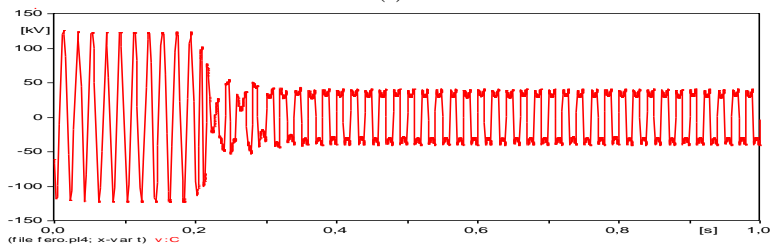
**Gambar 4.18** Diagram bifurkasi tegangan pada fasa B

c. Tegangan pada fasa C

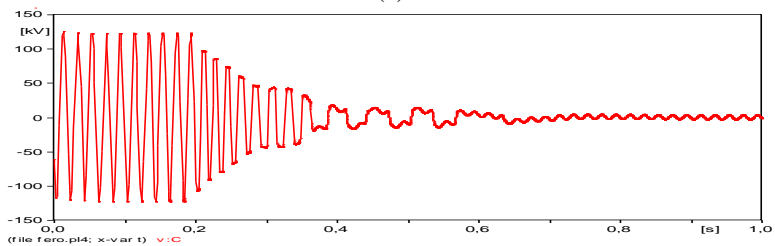
Gambar 4.19 merupakan hasil plot respon tegangan pada fasa C menggunakan perangkat lunak ATPDraw. Plot-plot tersebut menghasilkan beberapa karakteristik feroresonansi. Contoh feroresonansi dengan *Quasi-periodic mode* muncul pada saat nilai  $C_s$  0,003  $\mu\text{F}$  dan *Fundamental mode* muncul pada saat nilai  $C_s$  0,03  $\mu\text{F}$ . Sedangkan feroresonansi tidak muncul pada saat nilai  $C_s$  0,3  $\mu\text{F}$  dan 3  $\mu\text{F}$ . Gambar 4.20 merupakan diagram bifurkasi representasi tegangan pada fasa C. Pada interval 0,05  $\mu\text{F}$  dan 0,07 – 10  $\mu\text{F}$  tidak terjadi feroresonansi. Hal ini dibuktikan dengan titik-titik pada simulasi data ke-14 dan simulasi data ke-16 sampai dengan ke-37. Feroresonansi tipe *Fundamental* terdapat pada interval 0,03 – 0,04  $\mu\text{F}$  dan 0,06  $\mu\text{F}$ . Hal tersebut dibuktikan dengan bentuk titik-titik pada simulasi data ke-12 sampai dengan ke-13 dan simulasi data ke-15. Feroresonansi tipe lain seperti *Subharmonic* atau *Quasi-periodic* juga terdapat pada interval 0,001 – 0,02  $\mu\text{F}$ . Hal tersebut dibuktikan dengan bentuk titik-titik pada simulasi data ke-1 sampai dengan ke-11. Feroresonansi tipe *Chaotic* tidak muncul pada tegangan di fasa C.



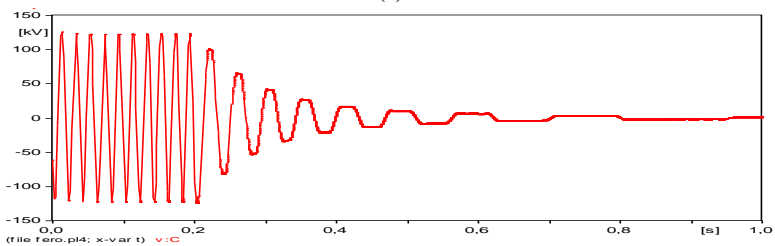
(a)



(b)

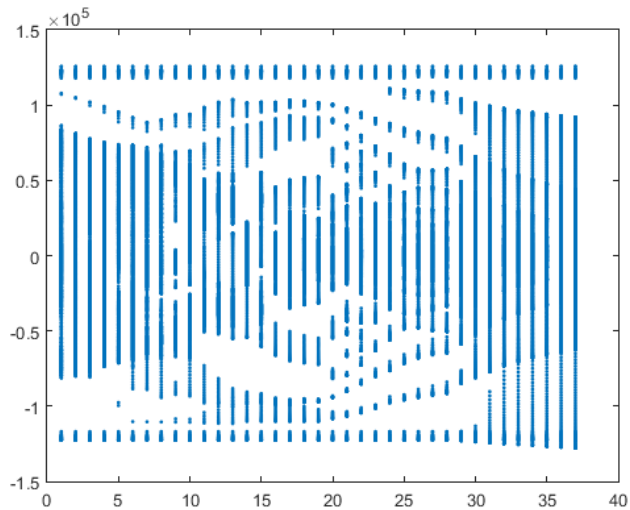


(c)



(d)

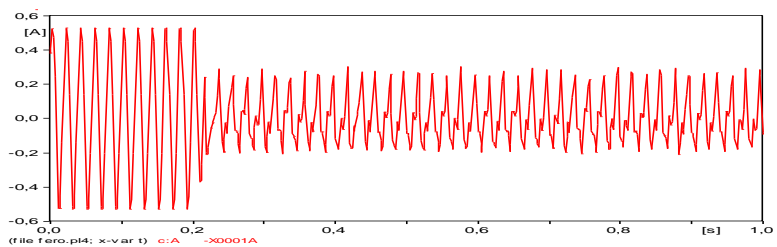
**Gambar 4.19** Respon tegangan dengan Cs 0,003  $\mu\text{F}$  (a) Respon tegangan dengan Cs 0,03  $\mu\text{F}$  (b) Respon tegangan dengan Cs 0,3  $\mu\text{F}$  (c) Respon tegangan dengan Cs 3  $\mu\text{F}$  (d) pada fasa C



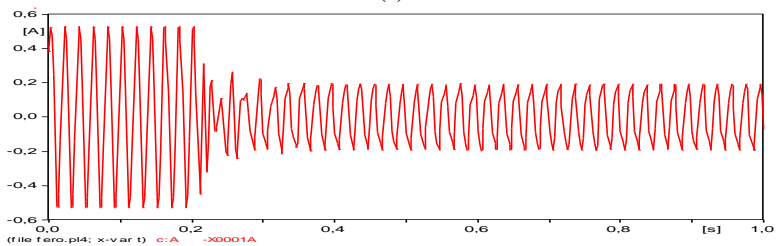
**Gambar 4.20** Diagram bifurkasi tegangan pada fasa C

d. Arus pada fasa A

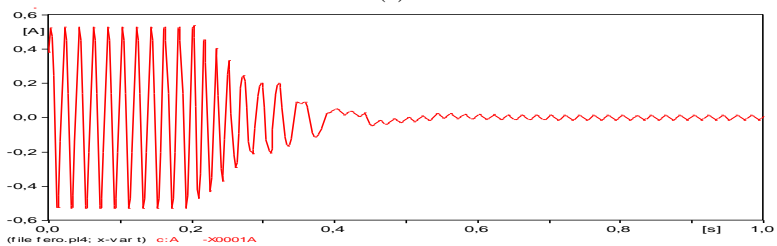
Gambar 4.21 merupakan hasil plot respon arus pada fasa A menggunakan perangkat lunak ATPDraw. Plot-plot tersebut menghasilkan beberapa karakteristik feroresonansi. Contoh feroresonansi dengan *Quasiperiodic mode* muncul pada saat nilai  $C_s$   $0,003 \mu F$  dan *Fundamental mode* muncul pada saat nilai  $C_s$   $0,03 \mu F$ . Sedangkan feroresonansi tidak muncul pada saat nilai  $C_s$   $0,3 \mu F$  dan  $3 \mu F$ . Gambar 4.22 merupakan diagram bifurkasi representasi arus pada fasa A. Pada interval  $0,05 - 0,07 \mu F$  dan  $0,2 - 10 \mu F$  tidak terjadi feroresonansi. Hal ini dibuktikan dengan titik-titik pada simulasi data ke-14 sampai dengan ke-16 dan simulasi data ke-20 sampai dengan ke-37. Feroresonansi tipe *Fundamental* terdapat pada interval  $0,004 - 0,006 \mu F$ ,  $0,008 - 0,04 \mu F$ , dan  $0,08 - 0,1 \mu F$ . Hal tersebut dibuktikan dengan bentuk titik-titik pada simulasi data ke-4 sampai dengan ke-6, simulasi data ke-8 sampai dengan data ke-13, dan simulasi data ke-17 sampai dengan ke-19. Feroresonansi tipe lain seperti *Subharmonic* atau *Quasi-periodic* juga terdapat pada interval  $0,001 - 0,003 \mu F$  dan  $0,007 \mu F$ . Hal tersebut dibuktikan dengan bentuk titik-titik pada simulasi data ke-1 sampai dengan ke-3 dan simulasi data ke-7. Feroresonansi tipe *Chaotic* tidak muncul pada tegangan di fasa A.



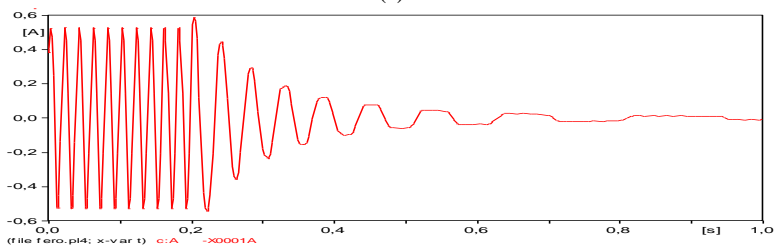
(a)



(b)



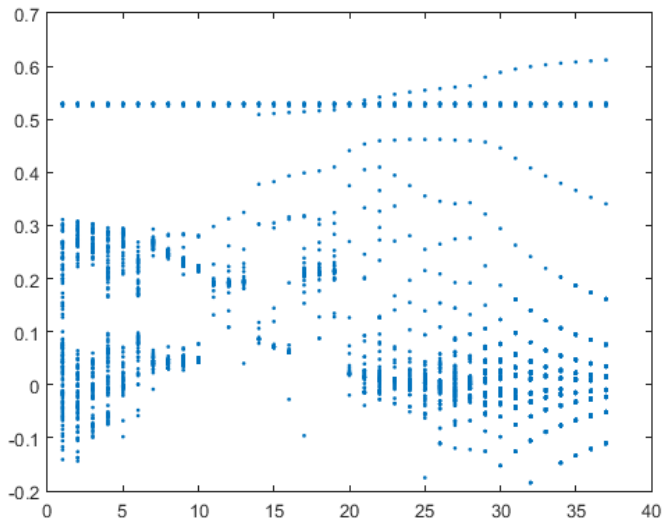
(c)



(d)

**Gambar 4.21** Respon arus dengan  $C_s$  0,003  $\mu\text{F}$  (a) Respon arus dengan  $C_s$  0,03  $\mu\text{F}$  (b) Respon arus dengan  $C_s$  0,3  $\mu\text{F}$  (c) Respon arus dengan  $C_s$  3  $\mu\text{F}$  (d) pada fasa A

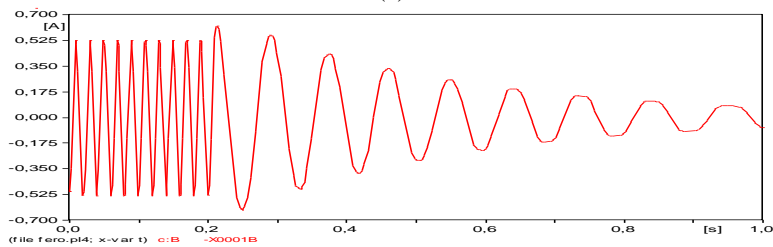
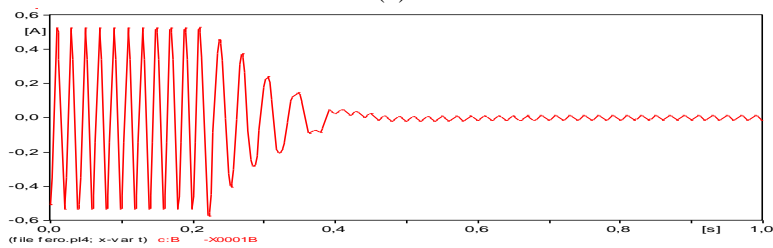
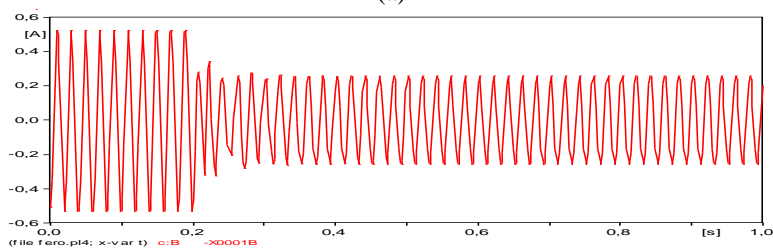
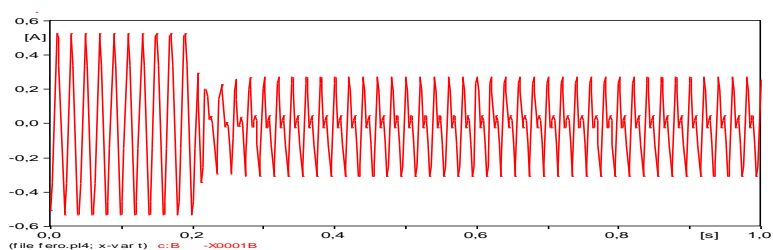




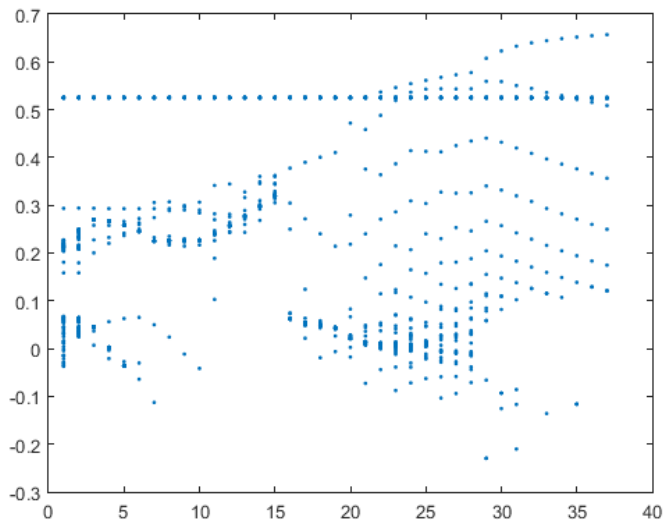
**Gambar 4.22** Diagram bifurkasi arus pada fasa A

e. Arus Pada Fasa B

Gambar 4.23 merupakan hasil plot respon arus pada fasa B menggunakan perangkat lunak ATPDraw. Plot-plot tersebut menghasilkan beberapa karakteristik feroresonansi. Contoh feroresonansi dengan *Subharmonic mode* muncul pada saat nilai  $C_s$  0,003  $\mu F$  dan *Fundamental mode* muncul pada saat nilai  $C_s$  0,03  $\mu F$ . Sedangkan feroresonansi tidak muncul pada saat nilai  $C_s$  0,3  $\mu F$  dan 3  $\mu F$ . Gambar 4.24 merupakan diagram bifurkasi representasi arus pada fasa B. Diagram bifurkasi tersebut memperlihatkan bahwa pada interval 0,07 - 10  $\mu F$  tidak terjadi feroresonansi. Hal ini dibuktikan dengan titik-titik pada simulasi data ke-16 sampai dengan ke-37. Feroresonansi tipe *Fundamental* muncul pada interval 0,005 - 0,03  $\mu F$  dan 0,05 - 0,1  $\mu F$ . Hal ini ditunjukkan dengan titik-titik pada simulasi data ke-5 sampai dengan ke-12 dan simulasi data ke-14 sampai dengan ke-19. Feroresonansi tipe *Subharmonic* atau *Quasi-periodic* terdapat pada 0,004  $\mu F$ . Hal tersebut dibuktikan dengan bentuk titik-titik pada simulasi data ke-4. Feroresonansi tipe *Chaotic* tidak muncul pada arus di fasa B.



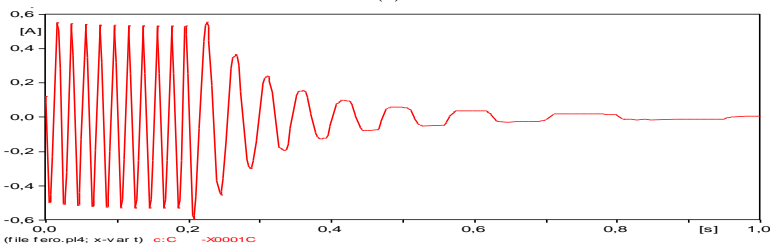
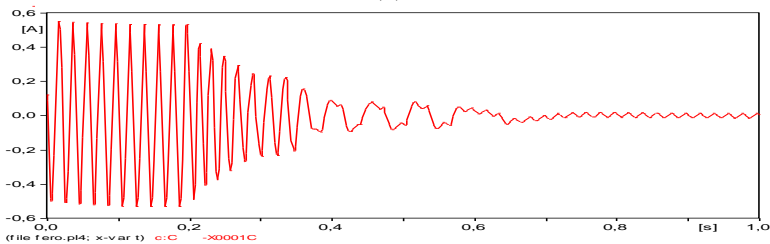
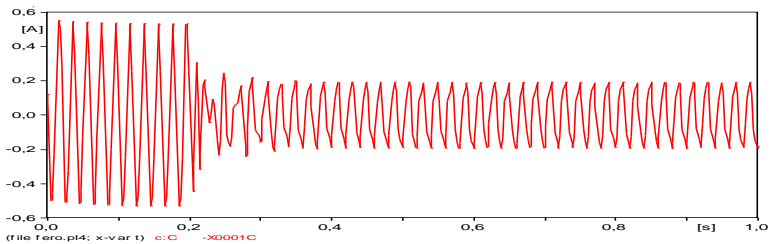
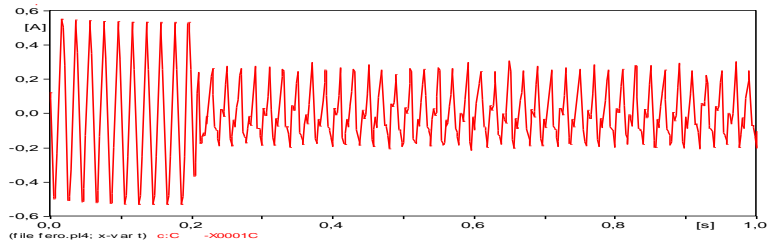
**Gambar 4.23** Respon arus dengan  $C_s$  0.003  $\mu\text{F}$  (a) Respon arus dengan  $C_s$  0.03  $\mu\text{F}$  (b) Respon arus dengan  $C_s$  0.3  $\mu\text{F}$  (c) Respon arus dengan  $C_s$  3  $\mu\text{F}$  (d) pada fasa B



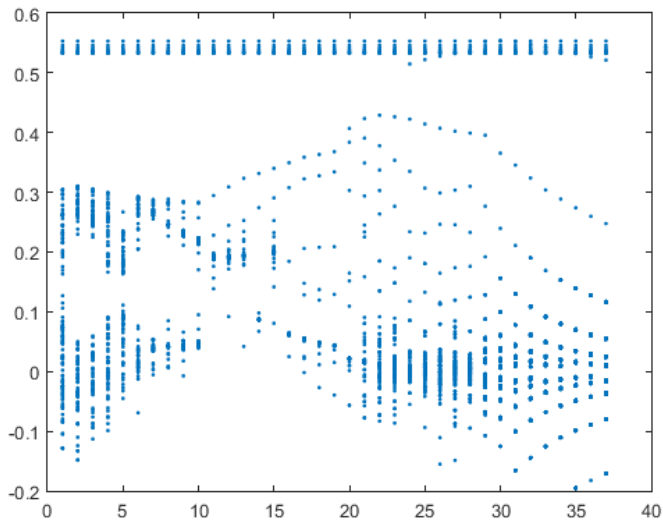
**Gambar 4.24** Diagram bifurkasi arus pada fasa B

f. Arus Pada Fasa C

Gambar 4.25 merupakan hasil plot respon arus pada fasa C menggunakan perangkat lunak ATPDraw. Plot-plot tersebut menghasilkan beberapa karakteristik feroresonansi. Contoh feroresonansi dengan *Quasi-periodic mode* muncul pada saat nilai  $C_s$  0,003  $\mu\text{F}$  dan *Fundamental mode* muncul pada saat nilai  $C_s$  0,03  $\mu\text{F}$ . Sedangkan feroresonansi tidak muncul pada saat nilai  $C_s$  0,3  $\mu\text{F}$  dan 3  $\mu\text{F}$ . Gambar 4.26 merupakan diagram bifurkasi representasi tegangan pada fasa C. Pada interval 0,05  $\mu\text{F}$  dan 0,07 – 10  $\mu\text{F}$  tidak terjadi feroresonansi. Hal ini dibuktikan dengan titik-titik pada simulasi data ke-14 dan simulasi data ke-16 sampai dengan ke-37. Feroresonansi tipe *Fundamental* terdapat pada interval 0,03 – 0,04  $\mu\text{F}$  dan 0,06  $\mu\text{F}$ . Hal tersebut dibuktikan dengan bentuk titik-titik pada simulasi data ke-12 sampai dengan ke-13 dan simulasi data ke-15. Feroresonansi tipe lain seperti *Subharmonic* atau *Quasi-periodic* juga terdapat pada interval 0,001 – 0,02  $\mu\text{F}$ . Hal tersebut dibuktikan dengan bentuk titik-titik pada simulasi data ke-1 sampai dengan ke-11. Feroresonansi tipe *Chaotic* tidak muncul pada tegangan di fasa C.



**Gambar 4.25** Respon arus dengan  $C_s$  0,003  $\mu\text{F}$  (a) Respon arus dengan  $C_s$  0,03  $\mu\text{F}$  (b) Respon arus dengan  $C_s$  0,3  $\mu\text{F}$  (c) Respon arus dengan  $C_s$  3  $\mu\text{F}$  (d) pada fasa C



**Gambar 4.26** Diagram bifurkasi arus pada fasa C

Perbandingan hasil deteksi feroresonansi pada respon tegangan pada tiap fasa akibat variasi nilai *grading capacitance* dapat dilihat pada Tabel 4.3 dan untuk respon arus dapat dilihat pada Tabel 4.4. Berdasarkan Tabel 4.3 dan Tabel 4.4 terlihat bahwa hasil pada respon tegangan dan arus memiliki karakteristik yang sama pada nilai *shunt capacitance* yang sama. Pada fasa A terlihat bahwa feroresonansi terjadi pada interval  $0,001 - 0,004 \mu\text{F}$  dan  $0,08 - 0,1 \mu\text{F}$ . Pada fasa B terlihat bahwa feroresonansi terjadi pada interval  $0,001 - 0,06 \mu\text{F}$ . Sedangkan pada fasa C terlihat bahwa feroresonansi terjadi pada interval  $0,001 - 0,04 \mu\text{F}$  dan  $0,06 \mu\text{F}$ . Kesimpulan berdasarkan plot-plot dan diagram bifurkasi sebelumnya pada simulasi ini adalah perubahan nilai kapasitansi saluran pada *shunt capacitance* mempengaruhi kemunculan feroresonansi dan karakteristik transformator tiga fasa yang tidak simetri pada respon tegangan dan arus pada setiap fasa. Beberapa hasil respon tegangan dan respon arus pada fasa A, B, dan C menghasilkan nilai dan karakteristik yang tidak sama, meskipun nilai induktansi nonlinier pada fasa A dan B sama. Sehingga dapat disimpulkan juga bahwa perbedaan sudut fasa dengan nilai induktansi nonlinier yang sama mempengaruhi perubahan nilai *shunt capacitance* pada rangkaian simulasi.

**Tabel 4.3** Perbandingan hasil deteksi feroresonansi pada respon tegangan

Karakteristik	Nilai <i>shunt capacitance</i> pada respon tegangan ( $\mu\text{F}$ )		
	VA	VB	VC
Tidak Feroresonansi	0,05 - 0,07 0,2 - 10	0,07-10	0,05 0,07 - 10
<i>Fundamental mode</i>	0,004 – 0,006 ; 0,008 – 0,04 ; dan 0,08 – 0,1	0,007 - 0,06	0,03 - 0,04 0,06
<i>Subharmonic mode</i>	tidak ada	0,001 - 0,006	0,007 - 0,02
<i>Quasi-Periodic mode</i>	0,001 - 0,003 0,007	tidak ada	0,001 - 0,006
<i>Chaotic mode</i>	tidak ada	tidak ada	tidak ada

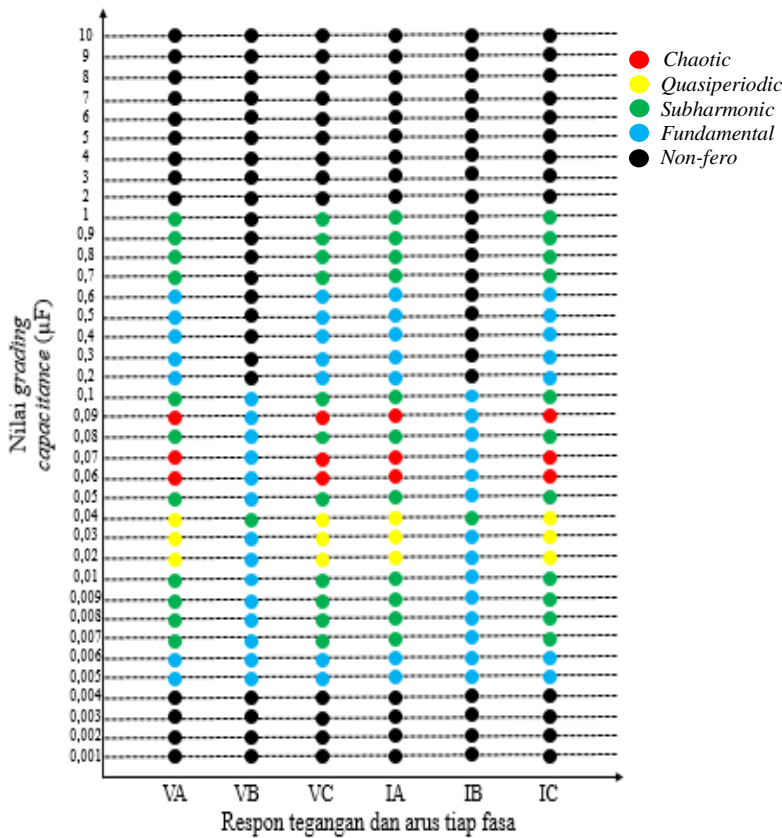
**Tabel 4.4** Perbandingan hasil deteksi feroresonansi pada respon arus

Karakteristik	Nilai <i>shunt capacitance</i> pada respon tegangan ( $\mu\text{F}$ )		
	IA	IB	IC
Tidak Feroresonansi	0,05 - 0,07 0,2 - 10	0,07-10	0,05 0,07 - 10
<i>Fundamental mode</i>	0,004 – 0,006 ; 0,008 – 0,04 ; dan 0,08 – 0,1	0,007 - 0,06	0,03 - 0,04 0,06
<i>Subharmonic mode</i>	tidak ada	0,001 - 0,006	0,007 - 0,02
<i>Quasi-Periodic mode</i>	0,001 - 0,003 0,007	tidak ada	0,001 - 0,006
<i>Chaotic mode</i>	tidak ada	tidak ada	tidak ada

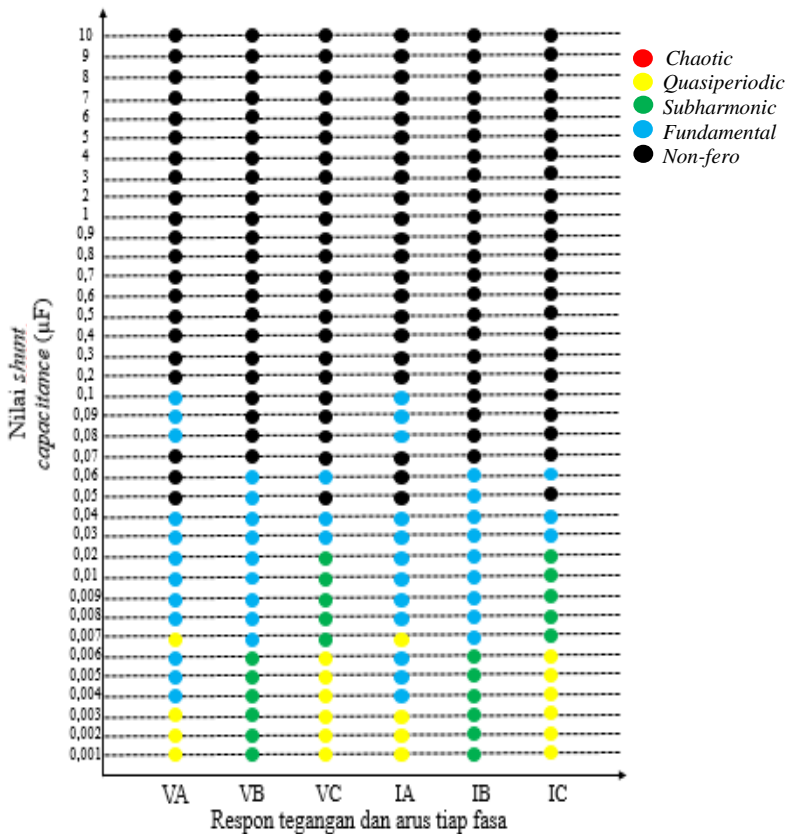
Pada diagram bifurkasi dari variasi *shunt capacitance*, terlihat bahwa terdapat beberapa titik dimana muncul *overcurrent*. Hal ini terjadi karena adanya pengaruh dari rangkaian feroresonansi seri yang terlihat pada rangkaian pemodelan. Hubungan antara *shunt capacitance* dan induktansi nonlinier pada rangkaian pemodelan menunjukkan hubungan

seri. Sehingga dari rangkaian tersebut dapat dihasilkan feroresonansi dengan respon gelombang *overcurrent* Hal ini dipengaruhi oleh nilai induktansi nonlinier yang berpadanan dengan nilai kapasitansi yang divariasikan.

Gambar 4.27 dan Gambar 4.28 merupakan hasil perbandingan antara variasi dari *grading capacitance* dan *shunt capacitance* pada respon tegangan dan respon arus pada tiap fasa. Dapat terlihat dengan jelas perbedaan munculnya feroresonansi beserta dengan karakteristik feroresonansi pada tiap fasa. Grafik pada gambar tersebut memiliki 5 warna berbeda yang mewakili tiap karakteristik dari feroresonansi.



Gambar 4.27 Hasil feroresonansi variasi *grading capacitance*



Gambar 4.28 Hasil ferroresonansi variasi *shunt capacitance*

#### 4.2.3 Pengaruh Waktu *Switching* Terhadap Ferroresonansi

Simulasi ini akan dilakukan pada salah satu fasa, yaitu fasa A dengan waktu pembukaan *switch* yang berbeda-beda. Sedangkan fasa B dan fasa C memiliki waktu pembukaan *switch* yang tetap, yaitu pada saat 0,2 sekon. Simulasi ini bertujuan untuk melihat pengaruh dari waktu *switching* terhadap ferroresonansi yang akan terjadi.

Pada saat kondisi normal, satu gelombang penuh dengan frekuensi 50 Hz memiliki waktu senilai 0,02 sekon. Karena simulasi ini berada pada delapan titik yang berbeda, sehingga kondisi *switch* akan terbuka mulai dari 0,02 sekon sampai dengan 0,02175 sekon dengan perbedaan waktu



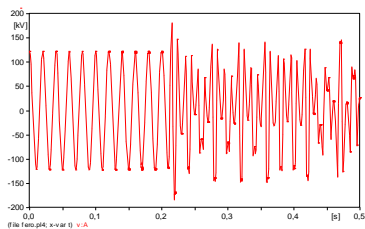
senilai 0,0025 sekon pada tiap titiknya. Total durasi pada simulasi adalah 0,5 sekon.

a. Analisa *Grading Capacitance*

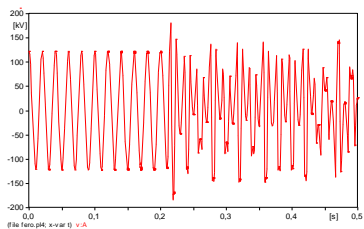
Simulasi ini memiliki *grading capacitance* senilai 0,09  $\mu\text{F}$  dengan *shunt capacitance* senilai 0,008  $\mu\text{F}$ . Berdasarkan hasil simulasi, respon tegangan dan arus pada fasa A tidak mengalami perubahan meskipun diberikan perbedaan waktu pembukaan *switching*. Hal tersebut juga tidak mempengaruhi respon tegangan dan arus pada fasa B dan C. Gambar 4.29 merupakan hasil simulasi respon tegangan dan Gambar 4.30 merupakan hasil simulasi respon arus dari *ATPDraw*. Karakteristik yang muncul pada fasa A tetap *Chaotic mode*. Hal ini sesuai dengan hasil plot respon tegangan dan arus pada pembahasan sebelumnya. Dapat disimpulkan bahwa pada *grading capacitance*, kemunculan dari feroresonansi tidak dipengaruhi oleh perubahan sudut fasa dan waktu pembukaan *switching*.

b. Analisa *Shunt Capacitance*

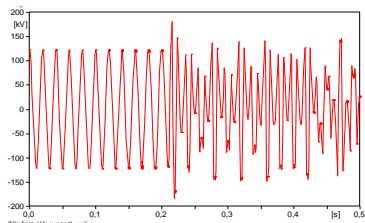
Simulasi ini memiliki *shunt capacitance* senilai 0,09  $\mu\text{F}$  dengan *grading capacitance* senilai 0,008  $\mu\text{F}$ . Berdasarkan hasil simulasi, respon tegangan dan arus pada fasa A mengalami perubahan karena diberikan perbedaan waktu pembukaan *switching*. Tetapi hal tersebut tidak mempengaruhi respon tegangan dan arus pada fasa B dan C. Gambar 4.31 merupakan hasil simulasi respon tegangan dan Gambar 4.32 merupakan hasil simulasi respon arus dari *ATPDraw*. Terdapat dua karakteristik yang muncul pada fasa A yaitu *Fundamental mode* dan tidak feroresonansi. Hal ini tidak sesuai dengan hasil plot respon tegangan dan arus pada pembahasan sebelumnya yang hanya menunjukkan karakteristik *Fundamental mode*. Berdasarkan hasil simulasi, *Fundamental mode* muncul saat *switching* terbuka pada saat 0,2 sekon dan 0,21 sekon. Hal ini menunjukkan bahwa pada *shunt capacitance*, kemunculan dari feroresonansi dipengaruhi oleh beda sudut antar fasa dan perubahan waktu pembukaan *switching*.



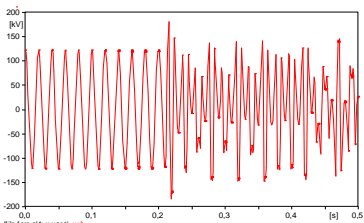
(a)



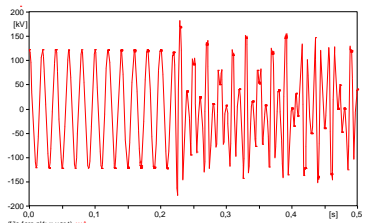
(b)



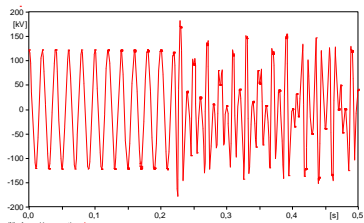
(c)



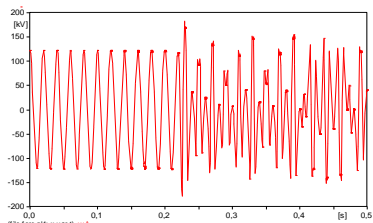
(d)



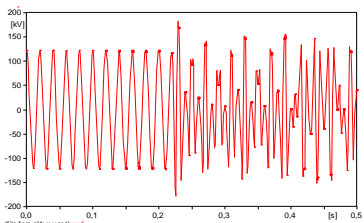
(e)



(f)

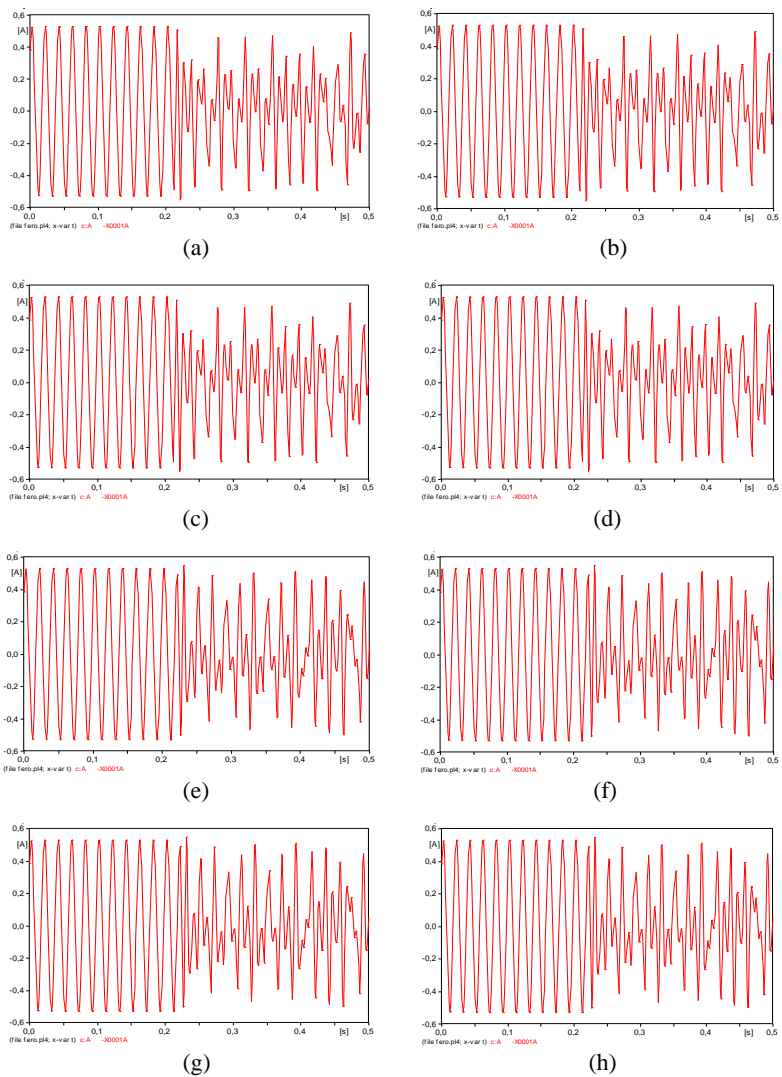


(g)

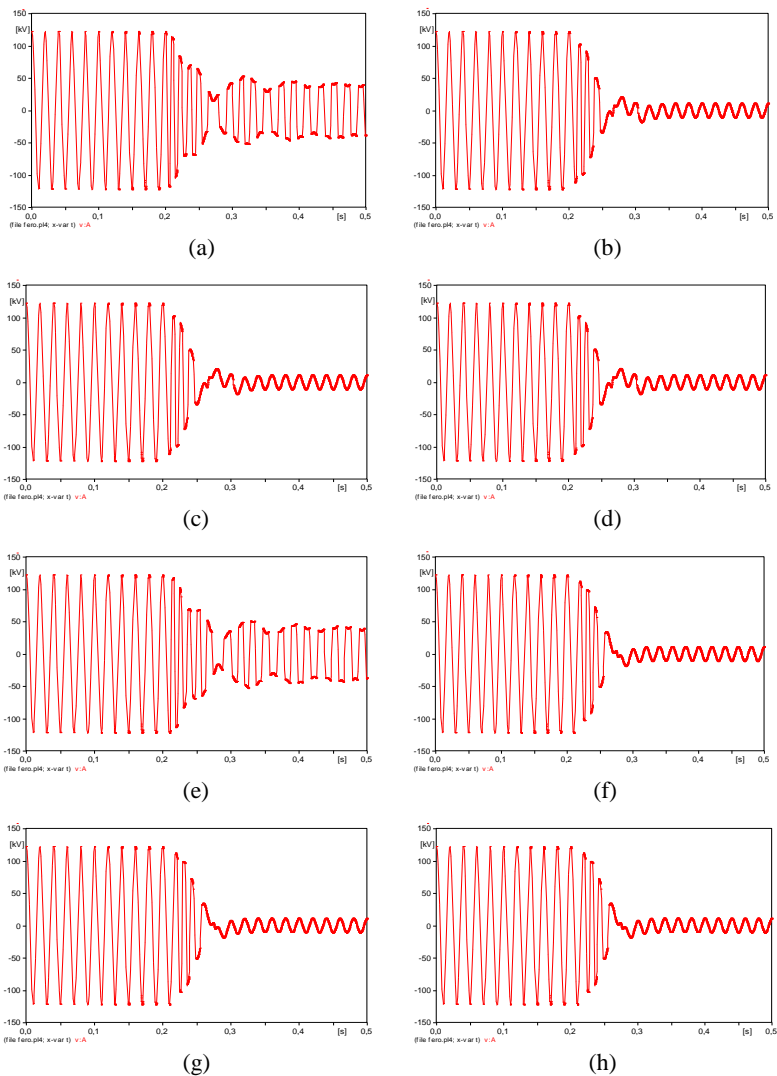


(h)

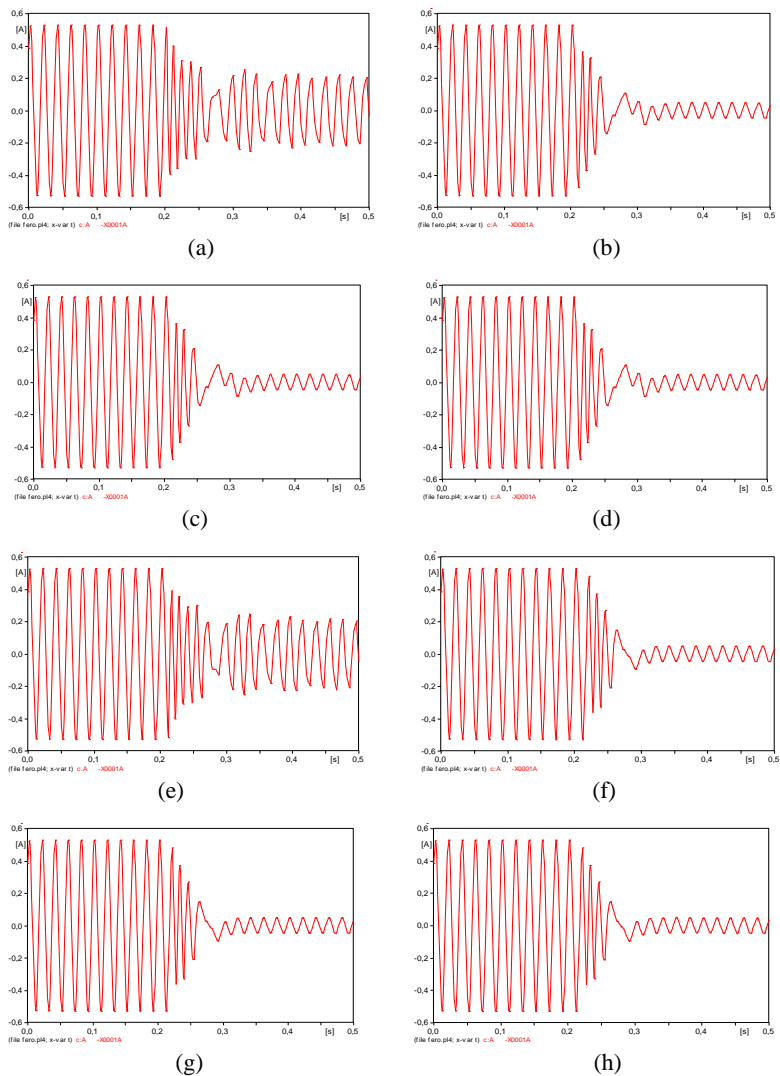
**Gambar 4.29** Respon tegangan saat *switching* terbuka pada 0,2 sekon (a) 0,2025 sekon (b) 0,205 sekon (c) 0,2075 sekon (d) 0,21 sekon (e) 0,2125 sekon (f) 0,215 sekon (g) 0,2175 sekon (h)



**Gambar 4.30** Respon arus saat *switching* terbuka pada 0,2 sekond (a) 0,2025 sekond (b) 0,205 sekond (c) 0,2075 sekond (d) 0,21 sekond (e) 0,2125 sekond (f) 0,215 sekond (g) 0,2175 sekond (h)



**Gambar 4.31** Respon tegangan saat *switching* terbuka pada 0,2 sekon (a) 0,2025 sekon (b) 0,205 sekon (c) 0,2075 sekon (d) 0,21 sekon (e) 0,2125 sekon (f) 0,215 sekon (g) 0,2175 sekon (h)



**Gambar 4.32** Respon arus saat *switching* terbuka pada 0,2 sek (a) 0,2025 sek (b) 0,205 sek (c) 0,2075 sek (d) 0,21 sek (e) 0,2125 sek (f) 0,215 sek (g) 0,2175 sek (h) 0,22 sek

*---Halaman ini sengaja dikosongkan---*

## BAB 5

### PENUTUP

#### 5.1 Kesimpulan

Berikut adalah kesimpulan berdasarkan hasil simulasi dan analisis mengenai deteksi feroresonansi pada transformator tiga fasa yang tidak simetri terhadap pengaruh dari pengubahan kapasitansi:

1. Ketidaksimetrian transformator tiga fasa pada induktansi nonliniernya dapat memunculkan fenomena feroresonansi dengan nilai kapasitansi yang divariasikan dengan parameter gangguan berupa *switching*.
2. Respon tegangan dan arus pada kasus pengubahan *grading capacitance*, menghasilkan nilai dan karakteristik yang sama pada fasa A dan C. Hal ini terjadi karena nilai induktansi nonlinier yang sama. Sedangkan pada fasa B terdapat nilai yang berbeda karena adanya perbedaan induktansi nonlinier dengan fasa A dan C. Feroresonansi dari respon tegangan dan arus pada fasa A dan C muncul pada interval  $0,005 - 1 \mu\text{F}$ . Dengan kecenderungan karakteristik *Subharmonic mode* atau *Quasi-periodic mode*. Sedangkan pada fasa B, feroresonansi muncul pada interval  $0,005 - 0,1 \mu\text{F}$ . Dengan kecenderungan karakteristik *Fundamental mode*.
3. Respon tegangan dan arus pada kasus pengubahan *shunt capacitance*, menghasilkan nilai dan karakteristik yang berbeda pada fasa A dan C. Meskipun nilai induktansi nonlinier pada kedua fasa tersebut sama, tetapi terdapat pengaruh dari sudut fasa yang menyebabkan perbedaan nilai dan karakteristik. Sedangkan pada fasa B terdapat nilai yang berbeda karena adanya perbedaan induktansi nonlinier dengan fasa A dan C. Feroresonansi dari respon tegangan dan arus pada fasa A muncul pada interval  $0,001 - 0,04 \mu\text{F}$  dan  $0,08 - 1 \mu\text{F}$ . Dengan kecenderungan karakteristik *Fundamental mode*. Pada fasa B, feroresonansi muncul pada interval  $0,001 - 0,06 \mu\text{F}$ . Dengan kecenderungan karakteristik *Fundamental* dan *Subharmonic mode*. Pada fasa C, feroresonansi muncul pada interval  $0,001 - 0,04 \mu\text{F}$  dan  $0,06 \mu\text{F}$ . Dengan kecenderungan karakteristik *Subharmonic* atau *Quasi-periodic mode*.
4. *Overvoltage* yang muncul pada rangkaian pemodelan disebabkan oleh adanya hubungan rangkaian feroresonansi paralel pada *grading capacitance* dengan induktansi nonlinier. Sedangkan *overcurrent*

yang muncul pada rangkaian pemodelan disebabkan oleh adanya hubungan rangkaian feroresonansi seri pada *shunt capacitance* dengan induktansi nonlinier.

5. Pada *grading capacitance* dengan nilai  $0,009 \mu\text{F}$ , perbedaan waktu pada pembukaan *switching* di fasa A tidak mempengaruhi hasil dan karakteristik pada fasa A, B, dan C. Karakteristik yang dihasilkan tetap *Chaotic mode* untuk fasa A. Sedangkan pada *shunt capacitance* dengan nilai  $0,009 \mu\text{F}$ , terdapat perbedaan hasil pada fasa A. Fasa B dan C tetap tidak terpengaruh. Hanya saja pada fasa A muncul dua kondisi yaitu feroresonansi dengan karakteristik *Fundamental mode* dan kondisi tidak terjadi feroresonansi. *Fundamental mode* hanya muncul saat *switch* terbuka pada saat 0,2 sekon dan 0,21 sekon.

## 5.2 Saran

Saran yang dapat diberikan dari studi ini untuk di masa yang akan datang adalah melakukan studi atau simulasi terkait dengan peredaman feroresonansi (*damping ferroresonance*) yang terjadi pada transformator tiga fasa yang tidak simetri. Studi ini merupakan tahapan awal dalam pembuatan studi peredaman tersebut karena pada studi ini telah dijabarkan terkait pendeteksian dan analisa feroresonansi pada transformator tiga fasa yang tidak simetri dengan nilai kapasitansi yang bervariasi. Sehingga dengan adanya studi lebih lanjut mengenai peredaman terhadap feroresonansi pada kasus ini dapat dijadikan acuan sebagai perancangan pada transformator tiga fasa yang dapat meminimalisir terjadinya fenomena feroresonansi.



## DAFTAR PUSTAKA

- [1] I Made Yulistya Negara, Daniar Fahmi, Naufal Arif Kurniawan, "Pengaruh Topologi Pemotongan Inti Transformator 3 Fasa Terhadap Arus Inrush Dan Rating Kerja", Tugas Akhir, 2016.
- [2] Javier Arturo Corea Araujo, "*Modeling And Analysis Of Power Transformers Under Ferroresonance Phenomenon*", Universitas Rovira, Virgili, 2015.
- [3] Tobing, Bonggas L, "*Peralatan Tegangan Tinggi*", PT. Gramedia Pustaka Utama, Jakarta 2013.
- [4] Stephen J. Chapman, "*Electric Machinery Fundamentals 4th edition*", Mc- Graw Hill, USA, 2005.
- [5] Satria Seventino Simamora, I Made Yulistya Negara, dan Daniar Fahmi, "*Studi Pemasangan Damping Reaktor Untuk Mengatasi Feroresonansi Pada Incoming 20 KV GIS Tandes*", Institut Teknologi Sepuluh Nopember, Surabaya, 2015.
- [6] Ferraci. Phillipe, "Cahier Technique Ferroresonance," in Groupe Schneider's Collection Techniques, No.190, March 1998.
- [7] ROCCIA, N. QUILLON, "Harmonics in industrial networks", Cahier Technique Merlin Gerin no 152.
- [8] E. BETTEGA, J.N. FIORINA, "Active harmonic conditioners and unity power factor rectifiers", Cahier Technique Merlin Gerin no 183.
- [9] Preecha Sakarung, Teratam Bunyagul, and Somchai Chatratana, "*Investigation and Mitigation of Overvoltage Due to Ferroresonance in the Distribution Network*", Journal of Electrical Engineering & Technology, Vol. 2, No. 3, 2007.
- [10] S. S. Simamora, I Made Yulistya Negara, dan Daniar Fahmi, "Studi Pemasangan Damping Reaktor untuk Mengatasi Feroresonansi pada Incoming 20 Kv GIS Tandes," Jurnal Teknik Pomits, Vol. 1, No. 1, 2015.
- [11] P. S. Moses and M. A. S. Masoum, "Modelling Ferroresonance in Asymmetric Three-Phase Power Transformer," in IEEE, 2009.
- [12] Elmo Price, "Tutorial on Ferroresonance", in Group ABB Inc 40th Annual Western Protective Relay Conference, Washington, October 2013.

*---Halaman ini sengaja dikosongkan---*

## LAMPIRAN

```
%List program pada perangkat lunak MATLAB
hit = 0;
hasilx = [];
hasily = [];
for nn = 1 : 37,      %jumlah data yang ada
    puncak = [];
    Namafile = [sprintf('%02d',nn), '.mat'];
    %jumlah digit pada data yang ada
    load(Namafile);
    puncak = findpeaks(vA);
    %masukkan nama respon tegangan atau arus
    berdasarkan ATPDraw
    for ii = 1 : size(puncak,1)
        hit = hit + 1;
        hasilx(hit) = nn;
        hasily(hit) = puncak(ii);
    end
end
plot(hasilx,hasily, '.');
```

```

ATP FILE
BEGIN NEW DATA CASE
C -----
-----
C Generated by ATPDRAW Mei, Minggu 28, 2017
C A Bonneville Power Administration program
C by H. K. Høidalen at SEfAS/NTNU - NORWAY 1994-
2015
C -----
-----
C dT >< Tmax >< Xopt >< Copt ><Epsiln>
.0001 1. 1.E-8
500 1 1 1 1 0
0 1 0
C 1 2 3 4 5 6
7 8
C
345678901234567890123456789012345678901234567890
123456789012345678901234567890
/BRANCH
C < n1 >< n2 ><ref1><ref2>< R >< L >< C >
C < n1 >< n2 ><ref1><ref2>< R >< A >< B
><Leng><><>0
XX0006XX0002 220. 0
XX0002A 1.745
0
A 6.5E6 0
98A 0.0 0.0 0
0.00745 123.79
0.018562 129.59
0.0745246 136.45
0.222739 137.82
9999
XX0008XX0003 220. 0
XX0003B 1.745 0
XX0005XX0006 .008 0
XX0006 .001 0
B 6.5E6 0
98B 0.0 0.0 0
0.00894 125.983

```

	0.02227	131.522	
	0.08943	140.528	
	0.26729	149.535	
	9999		
XX0010XX0004	220.		0
XX0004C	1.745		0
C	6.5E6		0
98C	0.0 0.0		0
	0.00745	123.79	
	0.018562	129.59	
	0.0745246	136.45	
	0.222739	137.82	
	9999		
XX0007XX0008	.008		0
XX0008	.001		0
VSA	3.E3 9.E3		0
VSb	3.E3 9.E3		0
VSC	3.E3 9.E3		0
XX0009XX0010			.008
0			
XX0010			.001
0			
NGR	20.		0
/SWITCH			
C < n 1>< n 2>< Tclose ><Top/Tde >< Ie ><Vf/CLOP			
>< type >			
A	X0001A	MEASURING	1
XX0005XX0006	-1.		.1
0			
B	X0001B	MEASURING	1
XX0007XX0008	-1.		1.
0			
C	X0001C	MEASURING	1
XX0009XX0010	-1.		1.
0			
/SOURCE			
C < n 1><>< Ampl. >< Freq. ><Phase/T0>< A1			
>< T1 >< TSTART >< TSTOP >			
14XX0005	122474.487	50.	-
1.	100.		

18NGR	1.0			
14XX0007	122474.487	50.	-12	-
1.	100.			
18NGR	1.0			
14XX0009	122474.487	50.	12	-
1.	100.			
18NGR	1.0			
14X0001A	1.E-20	50.		-
1.	10.			
18	7.5VSA			
14X0001B	1.E-20	50.		-
1.	10.			
18	7.5VSB			
14X0001C	1.E-20	50.		-
1.	10.			
18	7.5VSC			
/OUTPUT				
A	B	C	NGR	X0001A
BLANK BRANCH				
BLANK SWITCH				
BLANK SOURCE				
BLANK OUTPUT				
BLANK PLOT				
BEGIN NEW DATA CASE				
BLANK				

## RIWAYAT HIDUP



Krishanti Andarini, dilahirkan di Malang pada tanggal 16 Januari 1996. Anak pertama dari dua bersaudara. Selama kuliah penulis aktif dalam kegiatan UKM Sepak Bola ITS. Penulis pernah berkesempatan menjadi salah satu *presenter* dalam seminar internasional pada ISITIA tahun 2016 di Lombok. Saat ini penulis aktif sebagai salah satu asisten Laboratorium Tegangan Tinggi Departemen Teknik Elektro Fakultas Teknologi Elektro

ITS. Pendidikan formal yang telah ditempuh yaitu:

1. TK Tunas Jaka Sampurna
2. SD Islam Al-Azhar 9 Kemang Pratama
3. SMP Islam Al-Azhar 8 Kemang Pratama
4. SMA Labschool Rawamangun

Penulis dapat dihubungi pada email: [krsht16@gmail.com](mailto:krsht16@gmail.com).

*---Halaman ini sengaja dikosongkan---*



## RIWAYAT HIDUP



Krishanti Andarini, dilahirkan di Malang pada tanggal 16 Januari 1996. Anak pertama dari dua bersaudara. Selama kuliah penulis aktif dalam kegiatan UKM Sepak Bola ITS. Penulis pernah berkesempatan menjadi salah satu *presenter* dalam seminar internasional pada ISITIA tahun 2016 di Lombok. Saat ini penulis aktif sebagai salah satu asisten Laboratorium Tegangan Tinggi Departemen Teknik Elektro Fakultas Teknologi Elektro

ITS. Pendidikan formal yang telah ditempuh yaitu:

1. TK Tunas Jaka Sampurna
2. SD Islam Al-Azhar 9 Kemang Pratama
3. SMP Islam Al-Azhar 8 Kemang Pratama
4. SMA Labschool Rawamangun

Penulis dapat dihubungi pada email: [krsht16@gmail.com](mailto:krsht16@gmail.com).

*---Halaman ini sengaja dikosongkan---*